

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(43) 国際公開日
2002 年 11 月 14 日 (14.11.2002)

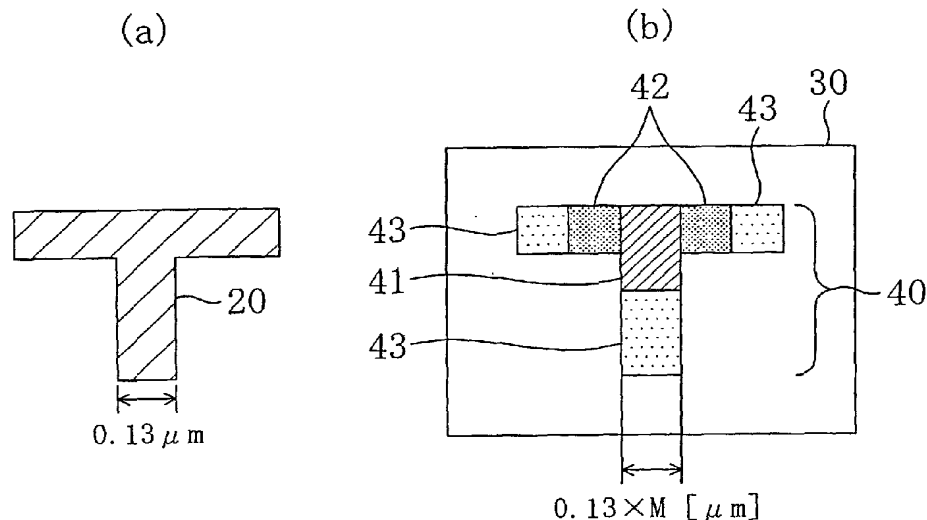
PCT

(10) 国際公開番号
WO 02/091079 A1

- (51) 国際特許分類: G03F 1/08 (72) 発明者; および
(75) 発明者/出願人 (米国についてののみ): 三坂 章夫 (MISAKA, Akio) [JP/JP]; 〒564-0004 大阪府 吹田市 原町 4-2 8-5-6 0 2 Osaka (JP).
- (21) 国際出願番号: PCT/JP02/03976
- (22) 国際出願日: 2002 年 4 月 22 日 (22.04.2002) (74) 代理人: 前田 弘, 外 (MAEDA, Hiroshi et al.); 〒550-0004 大阪府 大阪市 西区靱本町 1 丁目 4 番 8 号 太平ビル Osaka (JP).
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語 (81) 指定国 (国内): KR, US.
- (30) 優先権データ: (84) 指定国 (広域): ヨーロッパ特許 (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR).
- 特願2001-133802 2001 年 5 月 1 日 (01.05.2001) JP
特願2002-1033 2002 年 1 月 8 日 (08.01.2002) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 松下電器産業株式会社 (MATSUSHITA ELECTRIC INDUSTRIAL CO., LTD.) [JP/JP]; 〒571-8501 大阪府 門真市 大字門真 1 0 0 6 番地 Osaka (JP).
- 添付公開書類:
— 国際調査報告書
- 2 文字コード及び他の略語については、定期発行される各 PCT ガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

(54) Title: PHOTO MASK, PRODUCTION METHOD OF THE SAME, PATTERN FORMING METHOD USING THE PHOTO MASK

(54) 発明の名称: フォトマスク、その作成方法及びそのフォトマスクを用いたパターン形成方法



(57) Abstract: A mask pattern (40) having a shade portion (41) composed of a shade film such as a chromium film and phase shifters (42, 43) is formed on a transparent substrate (30). The phase shifter (42 or 43) causes a phase difference of 180 degrees of the exposure light between the phase shifter (42 or 43) and the transparent substrate (30). A first light intensity generated by exposure light passing through the phase shifter (42 or 43) in a shade image formation region corresponding to the mask pattern (40) on the material to be exposed is not greater

[続葉有]



WO 02/091079 A1



than four times of a second light intensity generated in the shade image formation region by the exposure light coming onto the rear side of the mask pattern (40) passing through a peripheral portion of the mask pattern (40) in the transparent substrate (30).

(57) 要約:

透過性基板 30 上に、クロム膜等の遮光膜よりなる遮光部 41 と位相シフター 42 及び 43 とを有するマスクパターン 40 が形成されている。位相シフター 42 又は 43 は、透過性基板 30 との間で露光光に対して 180 度の位相差を生じる。位相シフター 42 又は 43 を透過する露光光によって被露光材料上におけるマスクパターン 40 と対応する遮光像形成領域に生じる第 1 の光強度は、透過性基板 30 におけるマスクパターン 40 の周辺部を透過してマスクパターン 40 の裏側に回り込む露光光によって前記の遮光像形成領域に生じる第 2 の光強度の 4 倍以下である。

明細書

フォトマスク、その作成方法及びそのフォトマスクを用いたパターン形成方法

技術分野

本発明は、半導体装置又は液晶表示装置の製造に用いられるパターン露光用のフォトマスク、その作成方法及びそのフォトマスクを用いたパターン形成方法に関し、さらには、マスクパターンの設計方法に関する。

背景技術

近年、半導体を用いることにより実現される大規模集積回路装置（以下、LSIと称する。）の微細化が進展した結果、LSI製造工程の1つであるリソグラフィ工程において、マスクパターンと加工パターン（例えばレジスト膜に対するパターン転写により形成されたレジストパターン）との間の形状誤差又は寸法誤差が無視できなくなってきた。

また、LSIにおけるパターン寸法の微細化が、露光光の波長又は露光機の投影光学系の開口数等により定義される解像限界程度まで進んできた結果、LSI製造における歩留に関わる製造余裕度、例えばフォーカス深度等も著しく低下してきている。

従来のパターン形成方法により所望の形状のパターンをウェハ上のレジストパターンとして形成する場合、例えばクロム等の金属よりなる遮光膜を用いて透過性基板上に所望の形状の遮光性パターンつまりマスクパターンを形成した後、該マスクパターンが形成された透過性基板をマスクとしてレジスト膜が塗布されたウェハに対して露光を行なう。この露光工程によって、遮光膜よりなるマスクパターンと相似した形状を有する光強度分布がレジスト膜中に投影される。また、この光強度分布によってレジスト膜中に蓄積エネルギーが生じると共に、レジス

ト膜における蓄積エネルギーが所定の大きさ以上となった部分に反応が生じる。ここで、レジスト膜が反応を生じる大きさの蓄積エネルギーと対応する光強度を臨界強度と呼ぶ。

レジスト膜として例えばポジ型レジストを用いる場合、レジスト膜を現像することによって、レジスト膜における臨界強度以上の光強度が生じた部分が除去される。すなわち、パターン露光により被露光材料に発生する光強度分布における臨界強度値の分布形状又は寸法を所望のパターン形状に合わせることで、所望の形状のレジストパターンを形成することができる。

図53(a)～(d)は従来のパターン形成方法の各工程を示す断面図である。

まず、図53(a)に示すように、基板800の上に金属膜又は絶縁膜等よりなる被加工膜801を形成した後、図53(b)に示すように、被加工膜801の上にポジ型のレジスト膜802を形成する。その後、図53(c)に示すように、透過性基板811上にクロム膜等よりなる所定形状のマスクパターン812が形成されてなるフォトリソマスク810を介してレジスト膜802に対して露光光820を照射する。これにより、レジスト膜802におけるマスクパターン812と対応する部分（臨界強度以下の光強度しか生じない部分）が非露光部802aとなり、レジスト膜802におけるその他の部分（臨界強度以上の光強度が生じる部分）が露光部802bとなる。その後、図53(d)に示すように、レジスト膜802を現像することによって非露光部802aよりなるレジストパターン803を形成する。

前述のようなパターン形成方法においては一般的に縮小投影露光機が用いられる。縮小投影露光機は、例えば形成しようとするレジストパターンの寸法を数倍に拡大したマスクパターンが形成された透過性基板、つまりフォトリソマスクを用いて、基板となるウェハ上に形成された感光性樹脂よりなるレジスト膜に対して縮小投影露光を行なうことによってパターン形成を行なう。以下、本明細書の説明

において、各記号を次のように定義する。

NA：露光機の投影光学系の開口数（例えば0.6）

λ ：露光光（光源）の波長（例えば0.193 μm ）

M：露光機の倍率（縮小率の逆数、例えば4又は5）

L：ウェハ（被露光材料）上でのパターン寸法（設計値）

例えばウェハ上で所望のパターン寸法（設計値）が0.1 μm の場合、 $L = 0.1 \mu\text{m}$ であり、このとき、倍率 $M = 4$ の露光機で用いられるフォトマスク上のマスクパターン寸法は $0.1 \times 4 = 0.4 \mu\text{m}$ となる。尚、以下の説明を簡単にするために、フォトマスク上のマスクパターン寸法を表す場合においても、特別に断らない限り、ウェハ上での設計値つまりウェハ上での換算値（縮小率をかけた後の値）を用いる。

よく知られているように、光がその波長の半分以下の寸法を有するパターンによって遮光される場合、遮光像のコントラストは光の回折現象により低下してしまう。これは、縮小投影光学系において露光光の波長を λ 、倍率を M 、開口数を NA としたときに、マスクパターンが $M \times \lambda / NA$ で定義される値の半分よりも小さくなると、マスクパターンによって転写される像つまり遮光像のコントラストが低下することを意味している。

図54（a）は、図53（c）に示す露光工程で用いるフォトマスク810上のマスクパターン812のレイアウトの一例を示している。図54（a）に示すように、マスクパターン812は $0.26 \times M [\mu\text{m}]$ （ M ：露光工程で用いる露光機の倍率）の寸法（実寸）を有している。

図54（b）は、図54（a）に示すフォトマスク810によってレジスト膜802に投影される光強度分布のシミュレーション結果を示している。シミュレーション条件は、露光光820の波長 $\lambda = 193 \text{ nm}$ 、露光機の投影光学系の開口数 $NA = 0.6$ である。このとき、 $0.26 \times M [\mu\text{m}] \div 0.8 \times M \times \lambda / NA$ である。尚、図54（b）においては、2次元の相対座標系における相対光

強度（露光光の光強度を 1 としたときの光強度）の等高線を用いて光強度分布を示している。図 5 4（b）に示すように、レジスト膜 8 0 2 に転写される光強度分布はマスクパターン 8 1 2 の中心付近と対応する位置ではほとんど 0 に等しい。すなわち、マスクパターン 8 1 2 の遮光性は非常に良い。

図 5 4（c）は図 5 4（b）の A A' 線に沿った光強度分布のシミュレーション結果を示しており、図 5 4（d）は図 5 4（b）に示す光強度分布のシミュレーション結果からレジストパターン 8 0 3 の形状を予測した結果を示している。図 5 4（c）に示すように臨界強度が 0.3 であるとする、図 5 4（b）に示す光強度分布における臨界強度値の分布形状がマスクパターン 8 1 2 の形状とほぼ一致する結果、図 5 4（d）に示すようにほぼ所望の形状（破線で示す形状）を有するレジストパターン 8 0 3（斜線部）を形成できる。

図 5 5（a）は、図 5 3（c）に示す露光工程で用いるフォトマスク 8 1 0 上のマスクパターン 8 1 2 のレイアウトの他例を示している。図 5 5（a）に示すように、マスクパターン 8 1 2 は $0.13 \times M [\mu\text{m}]$ （M：露光工程で用いる露光機の倍率）の寸法（実寸）を有している。

図 5 5（b）は、図 5 5（a）に示すフォトマスク 8 1 0 によってレジスト膜 8 0 2 に投影される光強度分布のシミュレーション結果を示している。シミュレーション条件は、図 5 4（b）の場合と同様に、露光光 8 2 0 の波長 $\lambda = 193 \text{ nm}$ 、露光機の投影光学系の開口数 $NA = 0.6$ である。このとき、 $0.13 \times M [\mu\text{m}] \div 0.4 \times M \times \lambda / NA$ である。尚、図 5 5（b）においても、2次元の相対座標系における相対光強度の等高線を用いて光強度分布を示している。図 5 5（b）に示すように、レジスト膜 8 0 2 に転写される光強度分布はマスクパターン 8 1 2 の中心付近と対応する位置でも臨界強度値（0.3）の半分程度の値に達している。すなわち、露光光 8 2 0 の回折現象の影響のために、マスクパターン 8 1 2 の遮光性が低下している。

図 5 5（c）は図 5 5（b）の A A' 線に沿った光強度分布のシミュレーション

ン結果を示しており、図 5 5 (d) は図 5 5 (b) に示す光強度分布のシミュレーション結果からレジストパターン 8 0 3 の形状を予測した結果を示している。図 5 5 (c) に示すように臨界強度が 0.3 であるとする、図 5 5 (b) に示す光強度分布における臨界強度値の分布形状がマスクパターン 8 1 2 の形状と相似しない結果、図 5 5 (d) に示すようにレジストパターン 8 0 3 (斜線部) の形状は所望の形状 (破線で示す形状) から歪んでしまう。

すなわち、図 5 3 (a) ~ (d) に示す従来のパターン形成方法においては、マスクパターンを例えば完全遮光膜を用いて形成したとしても、マスクパターンによって λ/NA の半分以下の寸法を有する所望のパターンを形成することは困難である。従って、ウェハ上に形成することができるレジストパターンの寸法には限界が生じる。

そこで、マスクパターンによって生じる光強度分布のコントラストを強調して λ/NA の半分以下の寸法を有する所望のパターンを形成できるようにするために、透過性基板上にマスクパターンとして遮光膜よりなるパターンを形成するだけではなく、透過性基板における透光部 (マスクパターンが形成されていない部分) との間で露光光に対して 180 度の位相差を生じる位相シフターを形成する方法が H. Y. L i u 等により提案されている (P r o c. S P I E、V o l. 3 3 3 4、P. 2 (1 9 9 8))。この方法において、透光部と位相シフターとが λ/NA の半分以下の寸法の遮光膜よりなるパターン (以下、遮光パターンと称する場合がある) を挟んで配置されている場合、透光部及び位相シフターのそれぞれを透過して遮光パターンの裏側に回折した光が互いに打ち消し合うので、遮光パターンの遮光性を向上させることができる。

以下、H. Y. L i u 等による方法について図面を参照しながら説明する。

図 5 6 (a) は形成対象となる所望のパターン (レジストパターン) のレイアウトの一例を示している。図 5 6 (a) に示すように、パターン 8 3 0 は、 λ/NA の半分以下の寸法を有する部分パターン 8 3 0 a を有している。

図56 (b)、(c)は、図56 (a)に示すパターンを形成するために用いられる、従来の2枚のフォトマスクの平面図を示している。図56 (b)に示すように、第1のフォトマスク840を構成する透過性基板841上には遮光膜842が形成されていると共に、遮光膜842には、透光部となる第1の開口部843及び位相シフターとなる第2の開口部844が、部分パターン830aを形成するための遮光パターン842aを挟んで設けられている。また、図56 (c)に示すように、第2のフォトマスク850を構成する透過性基板851上には、第1のフォトマスク840の遮光パターン842aとの組み合わせによって、パターン830 (図56 (a) 参照) を形成するための遮光パターン852が形成されている。

図56 (b)、(c)に示す2枚のフォトマスクを用いたパターン形成方法は次の通りである。

まず、図56 (b)に示す第1のフォトマスクを用いて、ポジ型レジストよりなるレジスト膜が塗布された基板に対して露光を行なう。その後、第1のフォトマスクを用いた露光によって形成された潜像と、図56 (c)に示す第2のフォトマスクを用いた露光によって形成される潜像とにより図56 (a)に示すパターンが形成されるように位置合わせを行なう。その後、図56 (c)に示す第2のフォトマスクを用いて露光を行なった後、レジスト膜を現像してレジストパターンを形成する。これにより、第1のフォトマスクのみを用いた露光後に現像を行なった場合に形成されてしまう余分なパターン (図56 (a)に示すパターン以外の他のパターン) を、第2のフォトマスクを用いた露光により除去することができる。その結果、第2のフォトマスクのみを用いた露光によっては形成することができない λ/NA の半分以下の寸法を有するパターンを形成することができる。

ところで、H. Y. L i u等による方法においては、遮光パターンを透光部と位相シフターとの間に挟むことによって、遮光パターンによって生じる遮光像の

コントラストを向上させている。但し、この効果が生じるためには、透光部と位相シフターとが λ/NA の半分以下の間隔で隣り合っていないなければならない。一方、フォトマスク上で透光部と位相シフターとが遮光パターンを間に挟まずに連続して並んでいる場合においても、透光部と位相シフターとの境界と対応する光強度が臨界強度よりも小さくなってしまう。すなわち、透光部と位相シフターとの境界と対応した遮光像が形成されてしまう。従って、図56(b)に示すようなフォトマスクのみを用いた場合には、任意の形状の遮光分布（光強度分布における臨界強度よりも小さい領域の分布）を形成できないので、任意の形状のパターンを形成できない。その結果、通常のLSIのパターンレイアウト等の様に複雑な形状を有するパターンを作成するためには、図56(b)に示すようなフォトマスク（第1のフォトマスク）に加えて、図56(c)に示すようなフォトマスク（第2のフォトマスク）を用いた露光が必須となる。その結果、マスク費用が増大すると共に、リソグラフィにおける工程数の増加に起因してスループットが低下したり又は製造コストが増大する。

また、H. Y. L i u等による方法においては、次に説明するような別の問題もある。

図57(a)は形成対象となる所望のパターン（レジストパターン）のレイアウトの他例を示している。図57(a)に示すように、パターン860は、 λ/NA の半分以下の寸法を有するT字状の部分パターン860aを有している。

図57(b)、(c)は、図57(a)に示すパターンを形成するために用いられる、従来の2枚のフォトマスクの平面図を示している。図57(b)に示すように、第1のフォトマスク870を構成する透過性基板871上には遮光膜872が形成されていると共に、遮光膜872には、透光部となる第1の開口部873と、位相シフターとなる第2の開口部874及び第3の開口部875とが、部分パターン860aを形成するための遮光パターン872aを挟んで設けられている。また、図57(c)に示すように、第2のフォトマスク880を構成す

る透過性基板 881 上には、第 1 のフォトマスク 870 の遮光パターン 872 a との組み合わせによって、パターン 860 (図 57 (a) 参照) を形成するための遮光パターン 882 が形成されている。

しかしながら、図 57 (b) に示すように、第 1 のフォトマスク 870 において、遮光パターン 872 a の一部が位相シフター同士 (第 2 の開口部 874 及び第 3 の開口部 875) に挟まれてしまうため、言い換えると、遮光パターン 872 a の全体を、互いに反対位相となる透光部と位相シフターとの間だけに設けることができないため、遮光パターン 872 a の遮光性を向上させることができない。すなわち、位相シフターの効果を利用できるパターンレイアウトは制限される。

発明の開示

前記に鑑み、本発明は、1 枚のフォトマスクを用いた露光によって、任意の寸法又は形状を有するパターンを形成できるようにすることを目的とする。

前記の目的を達成するために、本発明に係る第 1 のフォトマスクは、露光光に対して透光性を有する透過性基板上に、露光光に対して遮光性を有するマスクパターンが設けられたフォトマスクを前提とし、マスクパターンは、透過性基板におけるマスクパターンが形成されていない透光部との間で露光光に対して $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下 (但し n は整数) の位相差を生じる位相シフターを有しており、位相シフターを透過する露光光によって被露光材料上におけるマスクパターンと対応する遮光像形成領域に生じる第 1 の光強度が、透過性基板におけるマスクパターンの周辺部を透過してマスクパターンの裏側に回り込む露光光によって遮光像形成領域に生じる第 2 の光強度の 4 倍以下である。

第 1 のフォトマスクによると、透過性基板上のマスクパターンに設けられた位相シフターを透過する露光光 (以下、シフター透過光と称する) によって遮光像

形成領域に生じる第1の光強度が、透過性基板におけるマスクパターンの周辺部を透過してマスクパターンの裏側に回り込む露光光（以下、マスクパターン回折光と称する）によって遮光像形成領域に生じる第2の光強度の4倍以下である。このとき、シフター透過光とマスクパターン回折光とは互いに180度の位相差を有するため、第1の光強度と第2の光強度とが互いに打ち消し合って、遮光像形成領域に最終的に生じる光強度は第2の光強度よりも小さくなる。従って、マスクパターンの遮光性を、完全遮光膜のみからなるマスクパターンよりも向上させることができるので、1枚のフォトマスクを用いた露光によって、任意の寸法又は形状を有するパターンを形成することができる。

本発明に係る第2のフォトマスクは、露光光に対して透光性を有する透過性基板上に、露光光に対して遮光性を有するマスクパターンが設けられたフォトマスクを前提とし、マスクパターンは、透過性基板におけるマスクパターンが形成されていない透光部との間で露光光に対して $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じる位相シフターを有しており、位相シフターを透過する露光光によって被露光材料上におけるマスクパターンと対応する遮光像形成領域に生じる第1の光強度が、透過性基板におけるマスクパターンの周辺部を透過してマスクパターンの裏側に回り込む露光光によって遮光像形成領域に生じる第2の光強度の0.5倍以上で且つ2倍以下である。

第2のフォトマスクによると、シフター透過光によって遮光像形成領域に生じる第1の光強度が、マスクパターン回折光によって遮光像形成領域に生じる第2の光強度の0.5倍以上2倍以下である。このとき、シフター透過光とマスクパターン回折光とは互いに180度の位相差を有するため、第1の光強度と第2の光強度とが互いに打ち消し合って、遮光像形成領域に最終的に生じる光強度は非常に小さくなる。従って、マスクパターンの遮光性を飛躍的に向上させることができるので、1枚のフォトマスクを用いた露光によって、任意の寸法又は形状を

有するパターンを形成することができる。

第1又は第2のフォトマスクにおいて、露光光に対して透過性基板とは異なる透過率を有する透過性膜が透過性基板上に形成されてなる位相シフターを用いてもよいし、又は、透過性基板が彫り込まれてなる位相シフターを用いてもよい。また、位相シフターが、マスクパターンと同じ外形形状の遮光膜に設けられた開口部に配置されていてもよい。このとき、マスクパターンと同じ外形形状の遮光膜が、露光光に対して15%以下の透過率を持つと共に透光部との間で露光光に対して $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じてもよい。

本発明に係る第1のパターン形成方法は、本発明に係る第1のフォトマスクを用いたパターン形成方法を前提とし、基板上にポジ型のレジスト膜を形成する工程と、レジスト膜にフォトマスクを介して露光光を照射する工程と、露光光を照射されたレジスト膜を現像して、レジスト膜におけるマスクパターンと対応する部分以外の他の部分を除去することにより、レジストパターンを形成する工程とを備え、レジスト膜におけるマスクパターンと対応する部分の幅を L としたときに、

$$L \leq 0.4 \times \lambda / NA$$

（但し、 λ は露光光の波長であり、 NA は露光機の縮小投影光学系の開口数である）

である。

第1のパターン形成方法によると、本発明に係る第1のフォトマスクを用いた露光を行なうため、従来と比べてレジストパターンの寸法精度を大きく向上させることができる。また、シフター透過光のデフォーカス特性とマスクパターン回折光のデフォーカス特性との違いを利用して、遮光像形成領域に最終的に生じる光強度分布におけるデフォーカス特性を向上できるので、パターン形成におけるフォーカスマージンを向上させることができる。

本発明に係る第2のパターン形成方法は、本発明に係る第1のフォトマスクを用いたパターン形成方法を前提とし、基板上にネガ型のレジスト膜を形成する工程と、レジスト膜にフォトマスクを介して露光光を照射する工程と、露光光を照射されたレジスト膜を現像して、レジスト膜におけるマスクパターンと対応する部分を除去することにより、レジストパターンを形成する工程とを備え、レジスト膜におけるマスクパターンと対応する部分の幅を L としたときに、

$$L \leq 0.4 \times \lambda / NA$$

(但し、 λ は露光光の波長であり、 NA は露光機の縮小投影光学系の開口数である)

である。

第2のパターン形成方法によると、本発明に係る第1のフォトマスクを用いた露光を行なうため、従来と比べてレジストパターンの寸法精度を大きく向上させることができる。また、シフター透過光のデフォーカス特性とマスクパターン回折光のデフォーカス特性との違いを利用して、遮光像形成領域に最終的に生じる光強度分布におけるデフォーカス特性を向上できるので、パターン形成におけるフォーカスマージンを向上させることができる。

本発明に係る第3のパターン形成方法は、本発明に係る第2のフォトマスクを用いたパターン形成方法を前提とし、基板上にポジ型のレジスト膜を形成する工程と、レジスト膜にフォトマスクを介して露光光を照射する工程と、露光光を照射されたレジスト膜を現像して、レジスト膜におけるマスクパターンと対応する部分以外の他の部分を除去することにより、レジストパターンを形成する工程とを備え、レジスト膜におけるマスクパターンと対応する部分の幅を L としたときに、

$$L \leq 0.4 \times \lambda / NA$$

(但し、 λ は露光光の波長であり、 NA は露光機の縮小投影光学系の開口数である)

である。

第3のパターン形成方法によると、本発明に係る第2のフォトマスクを用いた露光を行なうため、従来と比べてレジストパターンの寸法精度を大きく向上させることができる。また、シフター透過光のデフォーカス特性とマスクパターン回折光のデフォーカス特性との違いを利用して、遮光像形成領域に最終的に生じる光強度分布におけるデフォーカス特性を向上できるので、パターン形成におけるフォーカスマージンを向上させることができる。

本発明に係る第4のパターン形成方法は、本発明に係る第2のフォトマスクを用いたパターン形成方法を前提とし、基板上にネガ型のレジスト膜を形成する工程と、レジスト膜にフォトマスクを介して露光光を照射する工程と、露光光を照射されたレジスト膜を現像して、レジスト膜におけるマスクパターンと対応する部分を除去することにより、レジストパターンを形成する工程とを備え、レジスト膜におけるマスクパターンと対応する部分の幅を L としたときに、

$$L \leq 0.4 \times \lambda / NA$$

(但し、 λ は露光光の波長であり、 NA は露光機の縮小投影光学系の開口数である)

である。

第4のパターン形成方法によると、本発明に係る第2のフォトマスクを用いた露光を行なうため、従来と比べてレジストパターンの寸法精度を大きく向上させることができる。また、シフター透過光のデフォーカス特性とマスクパターン回折光のデフォーカス特性との違いを利用して、遮光像形成領域に最終的に生じる光強度分布におけるデフォーカス特性を向上できるので、パターン形成におけるフォーカスマージンを向上させることができる。

第1～第4のパターン形成方法において、露光光を照射する工程は斜入射照明法を用いることが好ましい。

このようにすると、孤立パターンの形成においても、小さい周期で配置される

パターンの形成においても最適な露光を行なえるので、任意のレイアウトを有する微細なパターンを高精度で形成することができる。

斜入射照明法を用いる場合、露光光のフォトマスクに対する入射方向は、レジスト膜に照射される露光光の強度が、レジスト膜におけるマスクパターンと対応する部分で最小値を有するように設定されていることが好ましく、このとき、該最小値がデフォーカス位置でベストフォーカス位置よりも小さくなるように設定されていることがさらに好ましい。

本発明に係る第1のフォトマスクの作成方法は、露光光に対して透光性を有する透過性基板上に、露光光に対して遮光性を有するマスクパターンが設けられたフォトマスクの作成方法を前提とし、マスクパターンとなる領域に、透過性基板におけるマスクパターンが形成されていない透光部との間で露光光に対して $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じる位相シフターを形成する工程を備え、位相シフターを形成する工程は、位相シフターを透過する露光光によって被露光材料上におけるマスクパターンと対応する遮光像形成領域に生じる第1の光強度が、透過性基板におけるマスクパターンの周辺部を透過してマスクパターンの裏側に回り込む露光光によって遮光像形成領域に生じる第2の光強度に比例するように位相シフターを形成する工程を含む。

第1のフォトマスクの作成方法によると、マスクパターンとなる領域に位相シフターを、シフター透過光によって遮光像形成領域に生じる第1の光強度が、マスクパターン回折光によって遮光像形成領域に生じる第2の光強度に比例するように形成する。このとき、シフター透過光とマスクパターン回折光とは互いに180度の位相差を有するため、第1の光強度と第2の光強度とが互いに打ち消し合って、遮光像形成領域に最終的に生じる光強度を第2の光強度よりも小さくすることができる。従って、マスクパターンの遮光性を完全遮光膜のみからなるマスクパターンよりも向上させることができるので、1枚のフォトマスクを用いた

露光によって、任意の寸法又は形状を有するパターンを形成することができる。

本発明に係る第2のフォトマスクの作成方法は、露光光に対して透光性を有する透過性基板上に、露光光に対して遮光性を有するマスクパターンが設けられたフォトマスクの作成方法を前提とし、マスクパターンとなる領域に、透過性基板におけるマスクパターンが形成されていない透光部との間で露光光に対して $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じる位相シフターを形成する工程を備え、位相シフターを形成する工程は、透過性基板におけるマスクパターンの周辺部が遮光膜によって覆われているとしたときにフォトマスクを透過する露光光によって被露光材料上におけるマスクパターンと対応する遮光像形成領域に生じる第1の光強度が、マスクパターンが遮光膜のみによって構成されているとしたときにフォトマスクを透過する露光光によって遮光像形成領域に生じる第2の光強度に比例するように位相シフターを形成する工程を含む。

第2のフォトマスクの作成方法によると、マスクパターンとなる領域に位相シフターを、透過性基板におけるマスクパターンの周辺部が遮光膜によって覆われているとしたときにフォトマスクを透過する露光光（つまりシフター透過光）によって遮光像形成領域に生じる第1の光強度が、マスクパターンが遮光膜のみによって構成されているとしたときにフォトマスクを透過する露光光（つまりマスクパターン回折光）によって遮光像形成領域に生じる第2の光強度に比例するように形成する。このとき、シフター透過光とマスクパターン回折光とは互いに180度の位相差を有するため、第1の光強度と第2の光強度とが互いに打ち消し合って、遮光像形成領域に最終的に生じる光強度を第2の光強度よりも小さくすることができる。従って、マスクパターンの遮光性を、完全遮光膜のみからなるマスクパターンよりも向上させることができるので、1枚のフォトマスクを用いた露光によって、任意の寸法又は形状を有するパターンを形成することができる。また、シフター透過光及びマスクパターン回折光のそれぞれの光強度を独立し

て計算できるので、各光強度の計算が容易になる。

第2のフォトリソの作成方法において、マスクパターンを構成する遮光膜が、露光光に対して15%以下の透過率を持つと共に透光部との間で露光光に対して $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下（但しnは整数）の位相差を生じてよい。

第1又は第2のフォトリソの作成方法において、位相シフターは、露光光に対して透過性基板と異なる透過率を有しており、位相シフターを形成する工程は、第1の光強度が第2の光強度の4倍以下になるように位相シフターの形成位置及び透過率を決定する工程を含むことが好ましい。

このようにすると、遮光像形成領域に最終的に生じる光強度を第2の光強度よりも確実に小さくできるので、マスクパターンの遮光性を確実に向上させることができる。

第1又は第2のフォトリソの作成方法において、位相シフターは、露光光に対して透過性基板と異なる透過率を有しており、位相シフターを形成する工程は、第1の光強度が第2の光強度の0.5倍以上で且つ2倍以下になるように位相シフターの形成位置及び透過率を決定する工程を含むことが好ましい。

このようにすると、遮光像形成領域に最終的に生じる光強度を非常に小さく小さくできるので、マスクパターンの遮光性を飛躍的に向上させることができる。

第1又は第2のフォトリソの作成方法において、マスクパターンは同じ外形形状の遮光膜を有しており、位相シフターは遮光膜に設けられた開口部に配置されており、位相シフターを形成する工程は、第1の光強度が所定値と等しくなるように開口部の幅を決定する工程を含むことが好ましい。

このようにすると、位相シフターの透過率を単一にできるので、フォトリソの作成が容易になる。

第1又は第2のフォトリソの作成方法において、マスクパターンは同じ外形形状の遮光膜を有しており、位相シフターは遮光膜に設けられた開口部に配置さ

れており、位相シフターを形成する工程は、第1の光強度が第2の光強度の4倍以下になるように開口部の幅を決定する工程を含むことが好ましい。

このようにすると、位相シフターの透過率を単一にできるので、フォトリソマスクの作成が容易になると共に、遮光像形成領域に最終的に生じる光強度を第2の光強度よりも確実に小さくできるので、マスクパターンの遮光性を確実に向上させることができる。

第1又は第2のフォトリソマスクの作成方法において、マスクパターンは同じ外形形状の遮光膜を有しており、位相シフターは遮光膜に設けられた開口部に配置されており、位相シフターを形成する工程は、第1の光強度が第2の光強度の0.5倍以上で且つ2倍以下になるように開口部の幅を決定する工程を含むことが好ましい。

このようにすると、位相シフターの透過率を単一にできるので、フォトリソマスクの作成が容易になると共に、遮光像形成領域に最終的に生じる光強度を非常に小さく小さくできるので、マスクパターンの遮光性を飛躍的に向上させることができる。

マスクパターンと同じ外形形状の遮光膜に設けられた開口部に位相シフターが配置される場合、マスクパターンの幅を L_m としたときに、

$$L_m \leq (0.5 \times \lambda / NA) \times M$$

(但し、 λ は露光光の波長であり、 NA は露光機の縮小投影光学系の開口数であり、 M は該縮小投影光学系の倍率である)
であることが好ましい。

このようにすると、開口部の面積が一定に保たれる範囲内で開口部形状を自由に設定できるので、遮光膜と基板との密着度等を考慮して開口部形状を選ぶことによりフォトリソマスクの信頼性を向上できる。

本発明に係る第3のフォトリソマスクの作成方法は、露光光に対して透光性を有する透過性基板上に、露光光に対して遮光性を有するマスクパターンが設けられた

フォトマスクの作成方法を前提とし、マスクパターンとなる領域に、透過性基板におけるマスクパターンが形成されていない透光部との間で露光光に対して $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じると共に露光光に対して透過率 T （但し $0 < T < 1$ ）を有する位相シフターを形成する工程を備え、位相シフターを形成する工程は、マスクパターンが遮光膜のみによって構成されているとしたときにフォトマスクを透過する露光光によって被露光材料上におけるマスクパターンと対応する遮光像形成領域に生じる光強度 I_a を計算する工程と、透過率 T が 1 であり、且つ透過性基板におけるマスクパターンの周辺部が遮光膜によって覆われているとしたときにフォトマスクを透過する露光光によって遮光像形成領域に生じる光強度 I_b を計算する工程と、 $4 \times I_a \geq T \times I_b$ が満たされるように位相シフターの形成位置及び前記透過率 T を決定する工程とを含む。

第 3 のフォトマスクの作成方法によると、シフター透過光の光強度（ $T \times I_b$ ）とマスクパターン回折光の光強度（ I_a ）とを独立して計算できるので、各光強度の計算が容易になる。また、シフター透過光の光強度をマスクパターン回折光の光強度の 4 倍以下にするので、遮光像形成領域に最終的に生じる光強度は第 2 の光強度よりも小さくなる。従って、マスクパターンの遮光性を、完全遮光膜のみからなるマスクパターンよりも向上させることができるので、1 枚のフォトマスクを用いた露光によって、任意の寸法又は形状を有するパターンを形成することができる。

本発明に係る第 4 のフォトマスクの作成方法は、露光光に対して透光性を有する透過性基板上に、露光光に対して遮光性を有するマスクパターンが設けられたフォトマスクの作成方法を前提とし、マスクパターンとなる領域に、透過性基板におけるマスクパターンが形成されていない透光部との間で露光光に対して $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じると共に露光光に対して透過率 T （但し $0 < T < 1$ ）を有する

位相シフターを形成する工程を備え、位相シフターを形成する工程は、マスクパターンが遮光膜のみによって構成されているとしたときにフォトマスクを透過する露光光によって被露光材料上におけるマスクパターンと対応する遮光像形成領域に生じる光強度 I_a を計算する工程と、透過率 T が 1 であり、且つ透過性基板におけるマスクパターンの周辺部が遮光膜によって覆われているとしたときにフォトマスクを透過する露光光によって遮光像形成領域に生じる光強度 I_b を計算する工程と、 $2 \times I_a \geq T \times I_b \geq 0.5 \times I_a$ が満たされるように位相シフターの形成位置及び透過率 T を決定する工程とを含む。

第 4 のフォトマスクの作成方法によると、シフター透過光の光強度 ($T \times I_b$) とマスクパターン回折光の光強度 (I_a) とを独立して計算できるので、各光強度の計算が容易になる。また、シフター透過光の光強度をマスクパターン回折光の光強度の 0.5 倍以上 2 倍以下にするので、遮光像形成領域に最終的に生じる光強度は非常に小さくなる。従って、マスクパターンの遮光性を飛躍的に向上させることができるので、1 枚のフォトマスクを用いた露光によって、任意の寸法又は形状を有するパターンを形成することができる。

第 3 又は第 4 のフォトマスクの作成方法において、マスクパターンを構成する遮光膜が、露光光に対して 15% 以下の透過率を持つと共に透光部との間で露光光に対して $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じてよい。

本発明に係る第 1 のマスクパターン設計方法は、露光光に対して透光性を有する透過性基板上に、露光光に対して遮光性を有するマスクパターンが設けられたフォトマスクを作成するためのマスクパターン設計方法を前提とし、マスクパターンは、透過性基板におけるマスクパターンが形成されていない透光部との間で露光光に対して $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じる位相シフターを有している。具体的には、本発明に係る第 1 のマスクパターン設計方法は、マスクパターンのレイアウト

であるパターンレイアウトを作成すると共に位相シフターの透過率 T を決定する工程と、パターンレイアウトを分割して複数の分割パターンを生成する工程と、パターンレイアウトの全体に遮光膜が配置されているとしたときにフォトマスクを透過する露光光によって被露光材料上における各分割パターンと対応する遮光像形成領域に生じる光強度 I_c を算出する工程と、各分割パターンのうち対応する光強度 I_c が所定値よりも大きい分割パターンに開口部が配置され且つフォトマスクにおけるその他の部分の全体に遮光膜が配置されているとしたときにフォトマスクを透過する露光光によって遮光像形成領域に生じる光強度 I_o を算出する工程と、各分割パターンのうち $I_c / I_o > T$ が成り立つ分割パターンには位相シフターを配置し、各分割パターンのうち $T / 4 > I_c / I_o$ が成り立つ分割パターンには遮光部を配置し、各分割パターンのうち $T \geq I_c / I_o \geq T / 4$ が成り立つ分割パターンには、位相シフターとなる開口部を有する遮光部を配置する工程とを備えている。

第1のマスクパターン設計方法によると、マスクパターン回折光の光強度と、シフター透過光の光強度とをそれぞれ独立に計算して、各光強度の比率に基づいて、遮光性を最大にできる、位相シフターの透過率やマスクエンハンサーの開口部寸法を求めることができる。このため、マスクパターンの任意のレイアウトに対して、遮光性を最大にできる、位相シフターの透過率やマスクエンハンサーの開口部寸法を簡単に求めることができる。

本発明に係る第2のマスクパターン設計方法は、露光光に対して透光性を有する透過性基板上に、露光光に対して遮光性を有するマスクパターンが設けられたフォトマスクを作成するためのマスクパターン設計方法を前提とし、マスクパターンは、透過性基板におけるマスクパターンが形成されていない透光部との間で露光光に対して $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じる位相シフターを有している。具体的には、本発明に係る第2のマスクパターン設計方法は、マスクパターンのレイアウト

であるパターンレイアウトを作成すると共に位相シフターの透過率 T を決定する工程と、パターンレイアウトを分割して複数の分割パターンを生成する工程と、パターンレイアウトの全体に遮光膜が配置されているとしたときにフォトマスクを透過する露光光によって被露光材料上における各分割パターンと対応する遮光像形成領域に生じる光強度 I_c を算出する工程と、各分割パターンのうち対応する光強度 I_c が所定値よりも大きい分割パターンに開口部が配置され且つフォトマスクにおけるその他の部分の全体に遮光膜が配置されているとしたときにフォトマスクを透過する露光光によって遮光像形成領域に生じる光強度 I_o を算出する工程と、各分割パターンのうち $I_c/I_o \geq T/4$ が成り立つ分割パターンには位相シフターを配置し、各分割パターンのうち $T/4 > I_c/I_o$ が成り立つ分割パターンには遮光部を配置する工程とを備えている。

第2のマスクパターン設計方法によると、第1のマスクパターン設計方法の効果に加えて、次のような効果が得られる。すなわち、マスクパターンとして、マスクエンハンサーを用いなくて、位相シフター及び遮光部のみを用いるので、十分な遮光性を実現できるマスクパターンデータを簡単に作成することができる。

本発明に係る第3のマスクパターン設計方法は、露光光に対して透光性を有する透過性基板上に、露光光に対して遮光性を有するマスクパターンが設けられたフォトマスクを作成するためのマスクパターン設計方法を前提とし、マスクパターンは、透過性基板におけるマスクパターンが形成されていない透光部との間で露光光に対して $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じる位相シフターを有している。具体的には、本発明に係る第3のマスクパターン設計方法は、マスクパターンのレイアウトであるパターンレイアウトを作成すると共に位相シフターの透過率 T を決定する工程と、露光光に対して位相シフターの遮光効果が遮光膜よりも高くなる最大幅 L_{max} を算出する工程と、パターンレイアウトのうち幅が L_{max} よりも大きい部分パターンには遮光部を配置し、パターンレイアウトのうち幅が L_{max} 以

下の部分パターンには位相シフターを配置する工程とを備えている。

第3のマスクパターン設計方法によると、マスクデータを用いた光学シミュレーションを用いることなく、パターンレイアウトの幅に基づいて遮光性を向上できるマスクパターンの設計を行なうので、マスクパターン設計が簡単になる。

本発明に係る第4のマスクパターン設計方法は、露光光に対して透光性を有する透過性基板上に、露光光に対して遮光性を有するマスクパターンが設けられたフォトマスクを作成するためのマスクパターン設計方法を前提とし、マスクパターンは、透過性基板におけるマスクパターンが形成されていない透光部との間で露光光に対して $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じる位相シフターを有している。具体的には、本発明に係る第4のマスクパターン設計方法は、マスクパターンのレイアウトであるパターンレイアウトを作成すると共に位相シフターの2種類の透過率 $T1$ 及び $T2$ （但し $T1 > T2$ ）を決定する工程と、パターンレイアウトを分割して複数の分割パターンを生成する工程と、パターンレイアウトの全体に遮光膜が配置されているとしたときにフォトマスクを透過する露光光によって被露光材料上における各分割パターンと対応する遮光像形成領域に生じる光強度 I_c を算出する工程と、各分割パターンのうち対応する光強度 I_c が所定値よりも大きい分割パターンに開口部が配置され且つフォトマスクにおけるその他の部分の全体に遮光膜が配置されているとしたときにフォトマスクを透過する露光光によって遮光像形成領域に生じる光強度 I_o を算出する工程と、各分割パターンのうち $I_c / I_o \geq T2 / 4$ が成り立つ分割パターンには位相シフターを配置し、各分割パターンのうち $T2 / 4 > I_c / I_o$ が成り立つ分割パターンには遮光部を配置する工程と、位相シフターが配置された各分割パターンのうち $I_c / I_o > (T1^{0.5} + T2^{0.5}) \times (T1^{0.5} + T2^{0.5})$ が成り立つ分割パターンにおいては位相シフターの透過率を $T1$ に設定し、位相シフターが配置された各分割パターンのうち $I_c / I_o \leq (T1^{0.5} + T2^{0.5}) \times (T1^{0.5} + T2^{0.5})$ が成り立

つ分割パターンにおいては位相シフターの透過率を T_2 に設定する工程とを備えている。

第4のマスクパターン設計方法によると、第1のマスクパターン設計方法の効果に加えて、次のような効果が得られる。すなわち、マスクパターンとして、マスクエンハンサーを用いなくて、位相シフター及び遮光部のみを用いるので、十分な遮光性を実現できるマスクパターンデータを簡単に作成することができる。また、複数の透過率を有する位相シフターが使用可能な状況において、より高い遮光性を実現されるように各透過率を有する位相シフターを設定できるので、異なる透過率の位相シフターを適切な位置に配置することができる。

第1～第4のマスクパターン設計方法において、パターンレイアウトに配置される遮光膜又は遮光部が、露光光に対して15%以下の透過率を持つと共に透光部との間で露光光に対して $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じてよい。

図面の簡単な説明

図1 (a) は完全遮光膜よりなるマスクパターンを有するフォトマスクの平面図であり、図1 (b) は図1 (a) に示すフォトマスクを用いて露光を行なっている様子を示す図であり、図1 (c) は図1 (a) に示すフォトマスクを用いた露光において被露光材料上に転写される光強度分布を示す図であり、図1 (d) は図1 (a) に示すフォトマスクを用いた露光においてマスクパターン線幅 L を色々変化させた場合に被露光材料上に転写される光強度分布のシミュレーション結果を示す図である。

図2はフォトマスクを用いた露光においてマスクパターンの線幅を色々変化させた場合における、レジスト膜上に転写される光強度分布の変化、及びレジスト膜の現像後に形成されるレジストパターンの形状の変化をそれぞれ示す図である。

図 3 は本発明のイメージ強調法の原理を示す模式図である。

図 4 は図 3 に示すイメージ強調マスクを用いた露光において位相シフターの線幅を色々変化させた場合に被露光材料上に転写される光強度分布のシミュレーション結果を示す図である。

図 5 (a) は本発明の第 1 の実施形態に係るパターン形成方法における形成対象となる所望のパターンの設計レイアウトの一例を示す図であり、図 5 (b) は図 5 (a) に示すパターンを形成するために用いられる、本発明の第 1 の実施形態に係るフォトマスクの平面図である。

図 6 (a) ~ (c) は本発明の第 1 の実施形態に係るパターン形成方法の各工程を示す断面図である。

図 7 (a) は図 5 (b) に示すフォトマスクによってレジスト膜に投影される光強度分布のシミュレーション結果を示す図であり、図 7 (b) は図 7 (a) の A A' 線に沿った光強度分布のシミュレーション結果を示す図であり、図 7 (c) は図 7 (a) に示す光強度分布のシミュレーション結果からレジストパターンの形状を予測した結果を示す図である。

図 8 (a) は位相シフターよりなるマスクパターンを有するフォトマスクの平面図であり、図 8 (b) は図 8 (a) に示すフォトマスクを用いて露光を行なっている様子を示す図である。

図 9 (a) は図 8 (a) に示すフォトマスクを用いた露光において位相シフターの透過率を色々変化させた場合に被露光材料上に転写される光強度分布のシミュレーション結果を示す図であり、図 9 (b) は図 8 (a) に示すフォトマスクを用いた露光において位相シフターの透過率及びマスクパターンの線幅 L を色々変化させた場合に被露光材料上に生じる光強度のシミュレーション結果を示す図であり、図 9 (c) は図 8 (a) に示すフォトマスクを用いた露光において位相シフターの透過率 T 及びマスクパターン線幅 L を色々変化させた場合に被露光材料上に生じる光強度のシミュレーション結果を、透過率 T 及び線幅 L をそれぞれ

縦軸及び横軸に取って光強度の等高線で表した様子を示す図である。

図 1 0 は本発明のマスクパターン重ね合わせ法の原理を、透過率 T の位相シフターよりなる線幅 L のマスクパターンを有するイメージ強調マスクの場合について示した模式図である。

図 1 1 (a) ~ (c) は図 1 0 に示すイメージ強調マスクを用いた露光において位相シフターの透過率 T 及びマスクパターン線幅 L を色々変化させた場合に被露光材料上に生じる光強度 $I_h(L, T)$ のシミュレーション結果を、透過率 T 及び線幅 L をそれぞれ縦軸及び横軸に取って光強度の等高線で表した様子を示す図である。

図 1 2 は本発明のマスクパターン重ね合わせ法の原理を、透過率 T の位相シフターよりなる正方形状 (1 辺の長さが L) のマスクパターンを有するイメージ強調マスクの場合について示した模式図である。

図 1 3 (a) ~ (c) は図 1 2 に示すイメージ強調マスクを用いた露光において位相シフターの透過率 T 及びマスクパターン幅 L を色々変化させた場合に被露光材料上に生じる光強度 $I_h(L, T)$ のシミュレーション結果を、透過率 T 及び幅 L をそれぞれ縦軸及び横軸に取って光強度の等高線で表した様子を示す図である。

図 1 4 (a) ~ (c) は図 1 0 に示すイメージ強調マスクを用いた露光において位相シフターの透過率 T 及びマスクパターン線幅 L を色々変化させた場合に $I_h(L, T) = I_c(L)$ が成り立つ条件を示す図である。

図 1 5 (a) は本発明の第 2 の実施形態に係るパターン形成方法における形成対象となる所望のパターンの設計レイアウトの一例を示す図であり、図 1 5 (b) は図 1 5 (a) に示すパターンを形成するために用いられる、本発明の第 2 の実施形態に係るフォトマスクの平面図である。

図 1 6 (a) ~ (c) は本発明の第 2 の実施形態に係るパターン形成方法の各工程を示す断面図である。

図 17 (a) は図 15 (b) に示すフォトマスクによってレジスト膜に投影される光強度分布のシミュレーション結果を示す図であり、図 17 (b) は図 17 (a) の A A' 線に沿った光強度分布のシミュレーション結果を示す図であり、図 17 (c) は図 17 (a) に示す光強度分布のシミュレーション結果からレジストパターンの形状を予測した結果を示す図である。

図 18 (a) は遮光膜と該遮光膜に設けられ且つ位相シフターとなる開口部とからなるマスクパターンを有するフォトマスクの平面図であり、図 18 (b) は図 18 (a) に示すフォトマスクを用いて露光を行なっている様子を示す図である。

図 19 (a) は図 18 (a) に示すフォトマスクを用いた露光において開口部幅 S を色々変化させた場合に被露光材料上に転写される光強度分布のシミュレーション結果を示す図であり、図 19 (b) は図 18 (a) に示すフォトマスクを用いた露光においてマスクパターン線幅 L 及び開口部幅 S を色々変化させた場合に被露光材料上に生じる光強度のシミュレーション結果を、マスクパターン線幅 L 及び開口部幅 S をそれぞれ縦軸及び横軸に取って光強度の等高線で表した様子を示す図である。

図 20 (a) は遮光膜と該遮光膜に設けられ且つ位相シフターとなる開口部とからなるマスクパターンを有するフォトマスクの平面図であり、図 20 (b) は図 20 (a) に示すフォトマスクを用いて露光を行なっている様子を示す図である。

図 21 (a) は図 20 (a) に示すフォトマスクを用いた露光において開口部幅 S を色々変化させた場合に被露光材料上に転写される光強度分布のシミュレーション結果を示す図であり、図 21 (b) は図 20 (a) に示すフォトマスクを用いた露光においてマスクパターン線幅 L 及び開口部幅 S を色々変化させた場合に被露光材料上に生じる光強度のシミュレーション結果を、マスクパターン線幅 L 及び開口部幅 S をそれぞれ縦軸及び横軸に取って光強度の等高線で表した様子

を示す図であり、図 2 1 (c) はマスクパターンの遮光性が最適化されたフォトマスクを用いた露光においてマスクパターン線幅 L を色々変化させた場合に被露光材料上に生じる光強度のシミュレーション結果を示す図である。

図 2 2 は本発明のマスクパターン重ね合わせ法の原理を、開口部幅 S のマスクエンハンサーよりなる線幅 L のマスクパターンを有するイメージ強調マスクの場合について示した模式図である。

図 2 3 (a) ~ (c) は図 2 2 に示すイメージ強調マスクを用いた露光においてマスクパターン線幅 L 及び開口部幅 S を色々変化させた場合に被露光材料上に生じる光強度 $I_e(L, S)$ のシミュレーション結果を、開口部幅 S 及びマスクパターン線幅 L をそれぞれ縦軸及び横軸に取って光強度の等高線で表した様子を示す図である。

図 2 4 は本発明のマスクパターン重ね合わせ法の原理を、開口部幅 S のマスクエンハンサーよりなる正方形状 (1 辺の長さが L) のマスクパターンを有するイメージ強調マスクの場合について示した模式図である。

図 2 5 (a) ~ (c) は図 2 4 に示すイメージ強調マスクを用いた露光においてマスクパターン幅 L 及び開口部幅 S を色々変化させた場合に被露光材料上に生じる光強度 $I_e(L, S)$ のシミュレーション結果を、開口部幅 S 及びマスクパターン幅 L をそれぞれ縦軸及び横軸に取って光強度の等高線で表した様子を示す図である。

図 2 6 (a) は線幅 L 、透過率 T の半透明膜よりなる半透明パターンを示す図であり、図 2 6 (b) ~ (d) はそれぞれ透過性基板に透過率 1.0 の開口部が設けられてなる開口パターンを示す図であり、図 2 6 (e) は、寸法 S を 0 から L まで変化させながら図 2 6 (b) ~ (d) のそれぞれに示す開口パターンに光を照射した場合における、開口部を透過した光の強度をシミュレーションで評価した結果を示す図である。

図 2 7 (a) は図 2 6 (a) に示す半透明パターンに光を照射した場合におけ

る半透明膜を透過した光の強度分布を、透過率 T を 0.5 としてシミュレーションで評価した結果を示す図であり、図27(b)～(d)は図26(b)～(d)のそれぞれに示す開口パターンに光を照射した場合における開口部を透過した光の強度分布を、等価透過率 T を 0.5 としてシミュレーションで評価した結果を示す図である。

図28はマスクエンハンサーよりなるマスクパターンの線幅が $0.8 \times \lambda / NA$ よりも小さい場合においてマスクパターンを構成する遮光部として半遮光部を用いた場合における本発明のイメージ強調法の原理を示す模式図である。

図29はマスクエンハンサーよりなるマスクパターンの線幅が $0.8 \times \lambda / NA$ よりも大きい場合においてマスクパターンを構成する遮光部として半遮光部を用いた場合における本発明のイメージ強調法の原理を示す模式図である。

図30(a)～(d)は、本発明のイメージ強調マスクにおいてマスクパターンを構成する遮光部として完全遮光部に代えて半遮光部を用いることの利点を説明する図である。

図31(a)～(g)はマスクエンハンサーを用いた露光によって被露光材料上に生じる光強度分布の露光光入射方向に対する依存性を説明するための図である。

図32(a)～(d)はマスクエンハンサーを利用したデフォーカス特性向上方法の原理を示す図である。

図33(a)～(d)はマスクエンハンサーを利用したデフォーカス特性向上方法の原理を示す図である。

図34(a)～(c)はデフォーカスによる光強度分布のプロファイル形状変化の露光光入射方向に対する依存性を説明するための図である。

図35(a)～(c)はデフォーカスによる光強度分布のプロファイル形状変化の露光光入射方向に対する依存性を説明するための図である。

図36(a)～(c)はデフォーカスによる光強度分布のプロファイル形状変

化の露光光入射方向に対する依存性を説明するための図である。

図37(a)～(c)はマスクエンハンサーにおける位相シフターとなる開口部の寸法が異なるフォトマスクを用いて各露光光入射方向からの露光を行なった場合のDOF特性をシミュレーションによって計算した結果を示す図である。

図38(a)は光源座標上のY軸と平行なライン状のマスクパターンを示す図であり、図38(b)は光源座標上のX軸及びY軸に対して対称であり且つ4回転対称である光源位置を示す図であり、図38(c)は図38(b)に示す座標(x, y)の光源位置から半径0.05の円光源を用いて露光を行なった場合における、完全遮光膜よりなるマスクパターンのDOFを各光源位置に対してマッピングした結果を示す図である。

図39(a)はマスクパターン幅がLであり、位相シフターとなる開口部の幅がSであるマスクエンハンサーを示す図であり、図39(b)～(d)は図39(a)に示すマスクエンハンサーよりなるマスクパターンのDOFを各光源位置に対してマッピングした結果を示す図である。

図40(a)は図38(c)及び図39(b)～(d)のそれぞれに示すDOFマップにおける対角線上の光源位置と対応するDOF値をプロットした結果を示す図であり、図40(b)～(d)は図39(b)～(d)のそれぞれに示すDOFマップにおける図38(c)に示すDOFマップと比べて0.05 μ m以上DOFが増加又は減少している領域を示す図である。

図41(a)～(d)は完全遮光膜よりなるマスクパターン(L/S=0.15/0 μ m)のDOFマップ、及びマスクエンハンサーよりなるマスクパターン(L/S=0.15/0.02、0.04、0.06 μ m)のDOFマップを、露光機の縮小投影光学系の開口数を0.6としてKrF光源及びF₂光源を用いた場合、並びに露光機の縮小投影光学系の開口数を0.7及び0.8としてArF光源を用いた場合のそれぞれについて求めて、各DOFマップに基づいて対角線上の光源位置と対応するDOF値を求めた結果を示す図である。

図 4 2 は本発明の第 4 の実施形態に係るマスクパターン設計方法の各工程を示すフローチャートである。

図 4 3 (a) ~ (h) は本発明の第 4 の実施形態に係るマスクパターン設計方法を説明するための図である。

図 4 4 (a) 及び (b) は本発明の第 4 の実施形態に係るマスクパターン設計方法を説明するための図である。

図 4 5 は本発明の第 4 の実施形態の第 1 変形例に係るマスクパターン設計方法の各工程を示すフローチャートである。

図 4 6 は本発明の第 4 の実施形態の第 1 変形例に係るマスクパターン設計方法の各工程を示すフローチャートである。

図 4 7 は本発明の第 4 の実施形態の第 1 変形例に係るマスクパターン設計方法を説明するための図である。

図 4 8 は本発明の第 4 の実施形態の第 2 変形例に係るマスクパターン設計方法の各工程を示すフローチャートである。

図 4 9 (a) 及び (b) は本発明の第 4 の実施形態の第 2 変形例に係るマスクパターン設計方法を説明するための図である。

図 5 0 は本発明の第 4 の実施形態の第 3 変形例に係るマスクパターン設計方法の各工程を示すフローチャートである。

図 5 1 は本発明の第 4 の実施形態の第 4 変形例に係るマスクパターン設計方法の各工程を示すフローチャートである。

図 5 2 (a) 及び (b) は本発明の第 4 の実施形態の第 4 変形例に係るマスクパターン設計方法を説明するための図である。

図 5 3 (a) ~ (d) は従来のパターン形成方法の各工程を示す断面図である。

図 5 4 (a) は図 5 3 (c) に示す露光工程で用いるフォトマスク上のマスクパターンのレイアウトの一例を示す図であり、図 5 4 (b) は図 5 4 (a) に示

すフォトマスクによってレジスト膜に投影される光強度分布のシミュレーション結果を示す図であり、図54(c)は図54(b)のAA'線に沿った光強度分布のシミュレーション結果を示す図であり、図54(d)は図54(b)に示す光強度分布のシミュレーション結果からレジストパターンの形状を予測した結果を示す図である。

図55(a)は図53(c)に示す露光工程で用いるフォトマスク上のマスクパターンのレイアウトの他例を示す図であり、図55(b)は図55(a)に示すフォトマスクによってレジスト膜に投影される光強度分布のシミュレーション結果を示す図であり、図55(c)は図55(b)のAA'線に沿った光強度分布のシミュレーション結果を示す図であり、図55(d)は図55(b)に示す光強度分布のシミュレーション結果からレジストパターンの形状を予測した結果を示す図である。

図56(a)は従来のパターン形成方法において形成対象となる所望のパターンのレイアウトの一例を示す図であり、図56(b)及び(c)は図56(a)に示すパターンを形成するために用いられる、従来の2枚のフォトマスクの平面図である。

図57(a)は従来のパターン形成方法において形成対象となる所望のパターンのレイアウトの他例を示す図であり、図57(b)及び(c)は図57(a)に示すパターンを形成するために用いられる、従来の2枚のフォトマスクの平面図である。

発明を実施するための最良の形態

以下、本発明を実現するために創案した、完全遮光膜よりなるマスクパターンよりも実効的な遮光性の高いマスクパターンを位相0度の光と位相180度の光との干渉を用いて形成する方法について図面を参照しながら説明する。

まず、光露光を用いたパターン形成において形成可能なパターン寸法に下限が

生じる理由について図 1 (a) ~ (d) を参照しながら説明する。

図 1 (a) は完全遮光膜よりなるマスクパターンを有するフォトマスクの平面図である。図 1 (a) に示すように、透過性基板 10 上に完全遮光膜よりなる線幅 L のマスクパターン 11 が形成されている。

図 1 (b) は、図 1 (a) に示すフォトマスクを用いて露光を行なっている様子を示しており、図 1 (c) は、図 1 (a) に示すフォトマスクを用いた露光において被露光材料上の図 1 (a) の A A' 線と対応する位置に転写される光強度分布を示している。図 1 (b) に示すように、露光光 12 はマスクパターン 11 によって遮られるが、透過性基板 10 におけるマスクパターン 11 の周辺を透過した露光光 12 つまり透過光 13 はその一部がマスクパターン 11 の裏側の領域 R に回折する。その結果、図 1 (c) に示すように、被露光材料上におけるマスクパターン 11 の中心部と対応する位置（横軸の 0）においても光強度 I_c が 0 にならない。

図 1 (d) は、図 1 (a) に示すフォトマスクを用いた露光においてマスクパターン 11 の線幅 L を色々変化させた場合に被露光材料上に転写される光強度分布のシミュレーション結果を示している。尚、シミュレーションにおける光学条件は、露光光の波長 $\lambda = 0.193 \mu\text{m}$ 、露光機の投影光学系の開口率 $NA = 0.6$ 、露光機の干渉度（コヒーレンス度） $\sigma = 0.8$ である。このとき、 $0.4 \times \lambda / NA$ の値が $0.13 \mu\text{m}$ 程度となる。図 1 (d) に示すように、線幅 L が $0.14 \mu\text{m}$ から $0.1 \mu\text{m}$ になったときに、被露光材料上におけるマスクパターン 11 の中心部と対応する位置（横軸の 0）において急激に光強度が高くなっている。すなわち、マスクパターン 11 の線幅 L が小さくなるにつれて、マスクパターン 11 の裏側に回り込む光が増加するために、マスクパターン 11 の遮光性が劣化して、形成可能なパターン寸法に限界が生じる。具体的には、マスクパターン 11 の線幅 L が $0.8 \times \lambda / NA$ 程度より小さくなると、マスクパターン 11 の裏側に回り込む光が増加し始めると共に、マスクパターン 11 の線幅 L

が $0.4 \times \lambda / NA$ 程度より小さくなると、マスクパターン 11 の裏側に回り込む光が急激に増加してパターン形成が困難になる。

図 2 は、フォトマスクを用いた露光においてマスクパターンの線幅を色々変化した場合における、被露光材料（具体的にはレジスト膜）上に転写される光強度分布の変化、及びレジスト膜の現像後に形成されるレジストパターンの形状の変化をそれぞれ示している。

図 2 に示すように、小さい線幅のレジストパターンを形成するためにはマスクパターンの線幅を小さくする必要がある。また、マスクパターン C のように線幅が十分に大きいマスクパターンの場合、露光光が十分に遮光されるので、所望の形状を有するレジストパターン C が形成される。また、マスクパターンの線幅を小さくするに従って、マスクパターンの遮光性が低下して、レジスト膜上におけるマスクパターンと対応する領域における光強度が大きくなる。このとき、マスクパターン B のように、遮光性が低下してもマスクパターン周辺からマスクパターンの裏側に回り込んだ光（以下、マスクパターン回折光と称する）によって光強度が臨界強度を越えない場合は、パターン解像が可能であり、マスクパターンの線幅を縮小することによって、レジストパターンの線幅も縮小できる。しかし、マスクパターン A のように、マスクパターン回折光によって光強度が臨界強度を越えてしまう場合には、もはやレジストパターンを形成することはできない。

次に、前述のマスクパターン回折光を打ち消すことによって、マスクパターンの遮光性を完全遮光膜よりも実効的に高くし、それによって所望の光強度分布を実現する方法（以下、イメージ強調法）について図 3 及び図 4 を参照しながら説明する。

図 3 は本発明のイメージ強調法の原理を示す模式図である。

一般に、お互いに反対位相の関係にある光同士、つまり 180 度の位相差を有する光同士は位相空間上において正負反対の光強度を有する。そのため、 180 度の位相差を有する光同士を干渉させると、お互いの光強度を打ち消し合うこと

ができる。この原理を利用して、マスクパターン周辺からの回折光をそれと反対位相の関係にある光と干渉させると、お互いの光強度を打ち消し合うことができるので、マスクパターンによって非常に高い遮光効果を実現できることになる。

図3に示す本発明のイメージ強調マスクにおいては、通常の透光部を透過する光に対して反対位相となる光を透過させる位相シフターをマスクパターンとして設けると共に、位相シフターを透過する光（以下、シフター透過光と称する）の強度を、位相シフター周辺つまりマスクパターン周辺の透光部からの回折光（つまりマスクパターン回折光）の強度と一致させる。これにより、マスクパターンの裏側で完全に光が遮光された状態が実現される。このとき、シフター透過光の強度の調節は、位相シフターの寸法又は透過率（露光光に対する）を調節することによって行なうことができる。

尚、イメージ強調マスクにおけるマスクパターン回折光の強度は、図3に示す遮光マスク（イメージ強調マスクの位相シフターに代えて完全遮光膜よりなる遮光部が設けられている）を用いて求めることができる。また、イメージ強調マスクにおけるシフター透過光の強度は、図3に示す位相シフト透過マスク（イメージ強調マスクの透光部に代えて完全遮光膜よりなる遮光部が設けられている）を用いて求めることができる。このとき、マスクパターン回折光の強度が I_c であり、シフター透過光の強度が I_o であるとする、イメージ強調マスクのマスクパターンの裏側で完全に光が遮光された状態が実現される条件は、 $I_c = I_o$ である。

図4は、図3に示すイメージ強調マスクを用いた露光においてマスクパターンつまり位相シフターの線幅を色々変化させた場合に被露光材料上に転写される光強度分布のシミュレーション結果を示している。尚、各線幅の位相シフターを有するイメージ強調マスクにおいて、位相シフターの透過率は、マスクパターン回折光が反対位相のシフター透過光によって最も打ち消されるように最適化されている。また、シミュレーションにおける光学条件は、図1（d）に示すシミュレ

ーションの光学条件と同様である。

図4に示す結果と図1(d)に示す結果とを比べてみると、イメージ強調マスクを用いた露光方法つまり本発明のイメージ強調法によって、線幅が $0.8 \times \lambda / NA$ 程度よりも小さいマスクパターンの遮光性が改善されており、それによって所望の光強度分布を実現できることがわかる。

第1の実施形態

以下、本発明の第1の実施形態に係るフォトマスク、その作成方法及びそのフォトマスクを用いたパターン形成方法について、図面を参照しながら説明する。

ところで、露光機の縮小投影光学系の倍率をMとすると、通常は、露光光に対して完全遮光膜となるクロム等の材料を用いて、所望のパターン（一般的にはレジストパターン）の設計値のM倍の大きさを有するマスクパターンを、露光光に対して高い透過率を有する材料からなる基板（以下、透過性基板と称する）上に描くことによりフォトマスクを作成し、そのフォトマスクを用いて露光が行なわれる。露光光としては、i線（波長365nm）、KrFエキシマレーザ光（波長248nm）、ArFエキシマレーザ光（波長193nm）、又はF₂エキシマレーザ光（波長157nm）等が用いられる。尚、本明細書においては、マスクパターンの寸法を表すときに、フォトマスク上の実寸（レジストパターンの寸法をM倍した値）に代えて、レジストパターンの寸法を用いて表す場合がある。

第1の実施形態の第1の特徴は、所望のパターンと対応するマスクパターンを遮光膜を用いて作成した場合において、露光時にマスクパターンによって被露光材料（具体的にはレジスト膜）に転写される光強度分布における光強度が十分に低下しない領域と対応する遮光膜部分を位相シフターで置き換えることによりマスクパターンを作成し、そのマスクパターンを有するフォトマスクを用いて露光を行なうことである。ここで、位相シフターとは、そこを透過する光の位相が通常の透光部を透過する光の位相に対して180度（具体的には $150 + 360$

$\times n$) 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下 (但し n は整数) 反転するような透光部を意味する。具体的には、位相シフターは、例えば露光光の波長の半分の光路差が生じる厚みを有する透過性膜等を用いて作成することができる。

また、第 1 の実施形態の第 2 の特徴は、マスクパターンとして設けられる位相シフターが複数の透過率を有していてもよく、遮光膜のみよりなるマスクパターンによって被露光材料に転写される光強度分布における光強度の低下度合いの弱い領域と対応する遮光膜部分ほど、高い透過率を有する位相シフターと置き換えるようにすることである。

図 5 (a) は、第 1 の実施形態における形成対象となる所望のパターン (レジストパターン) の設計レイアウトの一例を示している。図 5 (a) に示すように、パターン 20 の幅は $0.13 \mu\text{m}$ である。

図 5 (b) は、図 5 (a) に示すパターンを形成するために用いられる、第 1 の実施形態に係るフォトマスクの平面図を示している。図 5 (b) に示すように、第 1 の実施形態に係るフォトマスクは、透過性基板 30 上に、図 5 (a) に示すパターンと対応するマスクパターン 40 が形成されてなる。マスクパターン 40 は $0.13 \times M [\mu\text{m}]$ (M : 露光機の縮小投影光学系の倍率) の寸法 (実寸) を有している。また、マスクパターン 40 は、クロム膜等の遮光膜よりなる遮光部 41 と、透過率 10% の第 1 の位相シフター 42 と、透過率 50% の第 2 の位相シフター 43 とを有している。

尚、比較のため、図 5 (a) に示すパターンを形成するために用いられ、且つマスクパターンが遮光膜のみよりなる従来のフォトマスクの平面図を図 55 (a) (「従来の技術」参照) に示し、図 55 (a) に示すフォトマスクによってレジスト膜に投影される光強度分布のシミュレーション結果を図 55 (b) に示す。すなわち、図 5 (b) に示すマスクパターン 40 は、図 55 (a) に示すマスクパターン 812 を構成する遮光膜のうち遮光性が十分である部分はそのまま遮光部 41 として残し、該遮光膜のうち遮光性が十分でない部分を位相シフター (

第1の位相シフター42及び第2の位相シフター43)で置き換えたものになっている。ここで、遮光性が特に弱いマスクパターン812の先端に相当する部分は、より透過率の高い位相シフター(第2の位相シフター43)で置き換えている。

図6(a)～(c)は、第1の実施形態に係るパターン形成方法、具体的には、図5(b)に示すフォトマスクを用いた露光によるパターン形成方法の各工程を示す断面図である。まず、図6(a)に示すように、基板50の上に金属膜又は絶縁膜等よりなる被加工膜51を形成した後、被加工膜51の上にポジ型のレジスト膜52を形成する。その後、図6(b)に示すように、透過性基板30上にマスクパターン40が形成されてなる第1の実施形態に係るフォトマスク(図5(b)参照)を介してレジスト膜52に対して露光光53を照射する。これにより、レジスト膜52におけるマスクパターン40と対応する部分が非露光部52aとなり、レジスト膜52におけるその他の部分が露光部52bとなる。その後、図6(c)に示すように、レジスト膜52を現像することによって非露光部52aよりなるレジストパターン54を形成する。

図7(a)は、図5(b)に示すフォトマスクによってレジスト膜52に投影される光強度分布のシミュレーション結果を示している。シミュレーション条件は、露光光53の波長 $\lambda = 193\text{ nm}$ 、露光機の投影光学系の開口数 $NA = 0.6$ 、露光機の干渉度 $\sigma = 0.8$ である(以下、特に断らない限りシミュレーション結果を示す場合にはこのシミュレーション条件を用いている)。このとき、図5(b)に示すマスクパターン40の寸法について、 $0.13 \times M [\mu\text{m}] \div 0.4 \times M \times \lambda / NA$ の関係が成り立つ。尚、図7(a)においては、2次元の相対座標系における相対光強度の等高線を用いて光強度分布を示している。

図7(a)に示すシミュレーション結果と、図55(b)に示すシミュレーション結果とを比較すると、次のことがわかる。すなわち、マスクパターンが遮光膜のみよりなる従来のフォトマスクを用いた場合、マスクパターンの寸法が $\lambda /$

NAの半分程度以下まで細くなると、マスクパターンの先端部分等で遮光性が極度に低下する結果、光強度分布の形状が所望のパターン形状と著しく異なってしまう。それに対して、第1の実施形態に係るフォトマスクを用いた場合、マスクパターンにおける遮光膜によっては十分な遮光性が得られない部分に、より高い透過率の位相シフターを設けることにより、マスクパターン全体に亘って十分な遮光性を実現できるので、所望の形状により近い形状を有するレジストパターンを形成することができる。これは、位相0度の光と位相180度の光との干渉を利用することによって、位相シフターの実効的な遮光性が遮光膜よりも良くなる条件を用いたものである。

図7(b)は図7(a)のAA'線に沿った光強度分布のシミュレーション結果を示しており、図7(c)は図7(a)に示す光強度分布のシミュレーション結果からレジストパターン54の形状を予測した結果を示している。図7(b)に示すように臨界強度が0.3であるとする、図7(a)に示す光強度分布における臨界強度値の分布形状がマスクパターン40の形状とほぼ一致する結果、図7(c)に示すようにほぼ所望の形状(破線で示す形状)を有するレジストパターン54(斜線部)を形成できる。

以上に説明したように、第1の実施形態によると、フォトマスク上のマスクパターンに位相シフターを設けることにより、シフター透過光によってマスクパターン回折光を打ち消している。このため、マスクパターンの遮光性を、完全遮光膜のみからなるマスクパターンよりも向上させることができるので、1枚のフォトマスクを用いた露光によって、任意の寸法又は形状を有するパターンを形成することができる。

以下、第1の実施形態に係るフォトマスクにマスクパターンとして設ける位相シフターの透過率及び線幅と、マスクパターンによって被露光材料上に投影される光強度分布との関係について詳しく説明する。

図8(a)は位相シフターよりなるマスクパターンを有するフォトマスクの平

面図である。図 8 (a) に示すように、透過性基板 60 上に、位相シフターとなる透過性膜よりなる線幅 L のマスクパターン 61 が形成されている。

図 8 (b) は、図 8 (a) に示すフォトマスクを用いて露光を行なっている様子を示している。図 8 (b) に示すように、露光光 62 は、透過性基板 60 におけるマスクパターン 61 の周辺を透過して第 1 の透過光 63 となると共にマスクパターン 61 を透過して第 2 の透過光 64 となる。

図 9 (a) は、図 8 (a) に示すフォトマスクを用いた露光において位相シフターの透過率を色々変化させた場合に被露光材料上における図 8 (a) の AA' 線と対応する位置に転写される光強度分布のシミュレーション結果を示している。尚、シミュレーション条件は、露光光の波長 $\lambda = 0.193 \mu\text{m}$ 、露光機の投影光学系の開口率 $NA = 0.6$ 、露光機の干渉度 $\sigma = 0.8$ 、線幅 $L = 0.1 \mu\text{m}$ である。また、 AA' 線上の点 O はマスクパターン 61 の中心に位置している。

図 9 (a) に示すように、位相シフターの透過率が高くなるに従って、被露光材料上におけるマスクパターン 61 の中心 O と対応する位置（横軸の 0）の光強度が低下しており、光強度分布の形状が良くなっている。また、マスクパターン 61 が完全遮光膜（透過率 0%）よりなる場合に、光強度分布の形状が最悪となっている。しかしながら、第 1 の実施形態において、常に位相シフターの透過率が高ければよいというわけではない。以下、その理由について説明する。

図 9 (b) は、図 8 (a) に示すフォトマスクを用いた露光において位相シフターの透過率及びマスクパターンの線幅 L を色々変化させた場合に被露光材料上における図 8 (a) の点 O と対応する位置に生じる光強度のシミュレーション結果を示している。

図 9 (b) に示すように、各透過率の位相シフターよりなるマスクパターンに対して、実効的な遮光性が最も高くなる線幅 L が存在していると共に、完全遮光膜よりも遮光性が劣化し始める線幅 L が存在している。ところで、図 8 (a) に

示すフォトマスクにおいては、透過性基板 60 におけるマスクパターン 61 の周辺を透過してマスクパターン 61 の裏側に回り込む光（つまりマスクパターン回折光）を、マスクパターン 61 を透過する光（つまりシフター透過光）によって打ち消すことによって、マスクパターン 61 の遮光性を向上させている。このため、マスクパターン回折光とシフター透過光とのバランスが最適化された場合にはマスクパターン 61 の実効的な遮光性が最高となる。一方、マスクパターン回折光に対してシフター透過光が過剰になるとマスクパターン 61 の実効的な遮光性は低下し、場合によっては完全遮光膜よりなるマスクパターンの遮光性よりも低くなることもある。

図 9（c）は、図 8（a）に示すフォトマスクを用いた露光において位相シフターの透過率 T 及びマスクパターンの線幅 L を色々変化させた場合に被露光材料上における図 8（a）の点 O と対応する位置に生じる光強度のシミュレーション結果を、透過率 T 及び線幅 L をそれぞれ縦軸及び横軸に取って光強度の等高線で表した様子を示している。

図 9（c）において網掛け模様で示している領域が、マスクパターンの実効的な遮光性を最大にする、マスクパターンの線幅 L と位相シフターの透過率 T との組み合わせ条件を示している。すなわち、この組み合わせ条件が、マスクパターン回折光とシフター透過光とが相殺される条件である。従って、この組み合わせ条件に基づいて、各マスクパターンの線幅 L に対して、各マスクパターンの実効的な遮光性が最大になる位相シフターの透過率 T を定めていくことにより、マスクパターンによって被露光材料上に投影される光強度分布の形状を所望の形状に近づけてやることができる。

ところで、図 9（c）においては、色々なマスクパターンの線幅 L 及び位相シフターの透過率 T を用いて被露光材料上に転写される光強度分布を実際に計算することにより、マスクパターンの実効的な遮光性を最大にする線幅 L と透過率 T との組み合わせ条件（遮光性最大化条件）を求めている。しかしながら、この方

法で遮光性最大化条件を求めようとするすると計算時間が非常に長くなるので、例えばマスクパターンの任意の線幅 L に対する位相シフターの最適な透過率 T を求めることが困難になる。

そこで、次に、本願発明者が見出した、遮光性最大化条件の簡単な計算方法、具体的にはマスクパターンの任意の線幅 L に対して位相シフターの最適な透過率 T を求める簡単な方法（以下、マスクパターン重ね合わせ法と称する）について説明する。

図10は本発明のマスクパターン重ね合わせ法の原理を、透過率 T の位相シフターよりなる線幅 L のマスクパターンの場合について示した模式図である。

図10に示すように、透過率 T の位相シフターよりなる線幅 L のマスクパターンを有するフォトマスク（イメージ強調マスク）を用いた露光において、被露光材料上におけるマスクパターンの中心と対応する位置に生じる光強度を $I_h(L)$ とする。また、イメージ強調マスクの位相シフターに代えて完全遮光膜がマスクパターンとして設けられたフォトマスク（遮光マスク）を用いた露光において、被露光材料上におけるマスクパターンの中心と対応する位置に生じる光強度を $I_c(L)$ とする。また、イメージ強調マスクの位相シフターに代えて通常の透光部が設けられ、且つイメージ強調マスクの透光部に代えて完全遮光膜よりなる遮光部が設けられたフォトマスク（透過マスク）を用いた露光において、被露光材料上におけるマスクパターンの中心と対応する位置に生じる光強度を $I_o(L)$ とする。このとき、本発明のイメージ強調法の原理（図3参照）で説明したように、イメージ強調マスクにおいて、被露光材料上におけるマスクパターンの中心と対応する位置に生じるマスクパターン回折光の強度は $I_c(L)$ に相当すると共に、被露光材料上におけるマスクパターンの中心と対応する位置に生じるシフター透過光の光強度は $T \times I_o(L)$ に相当する。従って、光強度 $I_h(L, T)$ は、光強度 $I_c(L)$ 及び光強度 $T \times I_o(L)$ をそれぞれ位相空間上での光強度に換算して重ね合わせ、その結果を2乗した値によって近似すること

ができる。すなわち、

$$I_h(L, T) = \left((I_c(L))^{0.5} - (T \times I_o(L))^{0.5} \right)^2$$

である。

従って、イメージ強調マスクにおいて、 $I_h(L, T)$ が最小となる条件つまりマスクパターンの遮光性が最大になる条件は、

$$I_c(L) = T \times I_o(L)$$

である。すなわち、マスクパターンの任意の線幅 L に対する位相シフターの最適な透過率 T は、

$$T = I_c(L) / I_o(L)$$

により求めることができる。

図 11 (a) ~ (c) は、図 10 に示すイメージ強調マスクを用いた露光において位相シフターの透過率 T 及びマスクパターンの線幅 L を色々変化させた場合に被露光材料上におけるマスクパターンの中心と対応する位置に生じる光強度 $I_h(L, T)$ のシミュレーション結果を、透過率 T 及び線幅 L をそれぞれ縦軸及び横軸に取って光強度の等高線で表した様子を示している。ここで、図 11 (a) ~ (c) のそれぞれにおいて、前述の $T = I_c(L) / I_o(L)$ の関係を表すグラフを重ね書きしている。尚、図 11 (a) ~ (c) に示すシミュレーション結果はそれぞれ異なる露光光源を用いて得られたものであり、図 11 (a) に示すシミュレーション結果は円形の光源を用いた通常露光により得られたものであり、図 11 (b) に示すシミュレーション結果は輪帯状の光源を用いた輪帯露光により得られたものであり、図 11 (c) に示すシミュレーション結果は対角座標上の 4 点に位置する光源を用いた四重極露光により得られたものである。また、その他のシミュレーション条件は、露光光の波長 $\lambda = 0.193 \mu m$ 、露光機の投影光学系の開口率 $NA = 0.6$ である。

図 11 (a) ~ (c) に示すように、位相シフターの透過率 T 及びマスクパターンの線幅 L に対する光強度 $I_h(L, T)$ の依存性は、露光光源の形状によっ

て若干異なっているが、光強度 $I_h(L, T)$ が最小となる条件は露光光源の形状に関わらず $T = I_c(L) / I_o(L)$ の関係で正確に表すことができる。

図 1 2 は、マスクパターン重ね合わせ法の原理を、透過率 T の位相シフターよりなる正方形状（1 辺の長さが L ）のマスクパターンを有するイメージ強調マスクの場合について示した模式図である。図 1 2 に示すイメージ強調マスクにおいても、被露光材料上におけるマスクパターンの中心と対応する位置に生じるマスクパターン回折光の光強度は $I_c(L)$ に相当すると共に、被露光材料上におけるマスクパターンの中心と対応する位置に生じるシフター透過光の光強度は $T \times I_o(L)$ に相当する。従って、図 1 2 に示すイメージ強調マスクにおいても、マスクパターンの任意の幅 L に対する位相シフターの最適な透過率 T は、

$$T = I_c(L) / I_o(L)$$

により求めることができる。

図 1 3 (a) ～ (c) は、図 1 2 に示すイメージ強調マスクを用いた露光において位相シフターの透過率 T 及びマスクパターンの線幅 L を色々変化させた場合に被露光材料上におけるマスクパターンの中心と対応する位置に生じる光強度 $I_h(L, T)$ のシミュレーション結果を、透過率 T 及び線幅 L をそれぞれ縦軸及び横軸に取って光強度の等高線で表した様子を示している。ここで、図 1 3 (a) ～ (c) のそれぞれにおいて、前述の $T = I_c(L) / I_o(L)$ の関係を表すグラフを重ね書きしている。尚、図 1 3 (a) ～ (c) に示すシミュレーション結果はそれぞれ異なる露光光源を用いて得られたものであり、図 1 3 (a) に示すシミュレーション結果は円形の光源を用いた通常露光により得られたものであり、図 1 3 (b) に示すシミュレーション結果は輪帯状の光源を用いた輪帯露光により得られたものであり、図 1 3 (c) に示すシミュレーション結果は対角座標上の 4 点に位置する光源を用いた四重極露光により得られたものである。また、その他のシミュレーション条件は、露光光の波長 $\lambda = 0.193 \mu\text{m}$ 、露光機の投影光学系の開口率 $NA = 0.6$ である。

図13(a)～(c)に示すように、位相シフターの透過率 T 及びマスクパターンの幅 L に対する光強度 $I_h(L, T)$ の依存性は、露光光源の形状によって若干異なっているが、光強度 $I_h(L, T)$ が最小となる条件は露光光源の形状に関わらず $T = I_c(L) / I_o(L)$ の関係で正確に表すことができる。

すなわち、本発明のマスクパターン重ね合わせ法の適用が可能なマスクパターンの形状は特に限定されるものではない。

具体的には、本発明のイメージ強調法によって位相シフターよりなる任意形状のマスクパターンの実効的な遮光性を最大にする位相シフターの透過率 T の計算方法は次の通りである。

(1) イメージ強調マスクの位相シフターに代えて完全遮光膜が設けられた遮光マスクを用いた露光において被露光材料上におけるマスクパターンの中心付近と対応する位置 r に生じる光強度 $I_c(r)$ を計算する。

(2) イメージ強調マスクの位相シフターに代えて通常の透光部が設けられ、且つイメージ強調マスクの透光部に代えて完全遮光膜よりなる遮光部が設けられた透過マスクを用いた露光において、被露光材料上におけるマスクパターンの中心付近と対応する位置 r に生じる光強度 $I_o(r)$ を計算する。

(3) 位相シフターの最適な透過率 T を $T = I_c(L) / I_o(L)$ の関係に基づき求める。

尚、透過率 T の上限は1なので、 $T = I_c(L) / I_o(L)$ により求められた透過率 T が1を越える場合には、最適な透過率 T は1となる。

また、以上の説明においては単純な形状を有するマスクパターンを対象としてきたが、マスクパターンが複雑な形状を有する場合には、該マスクパターンを単純な形状を有する複数のパターンに分割して、各パターン毎に本発明のマスクパターン重ね合わせ法を適用すればよい。これにより、分割された各パターン毎に、位相シフターの最適な透過率 T が定まる。

以上に説明したように、第1の実施形態に係るフォトマスクにおいては、マス

クパターン回折光の強度を計算した後、シフター透過光の強度がマスクパターン回折光の強度と等しくなるように、位相シフターの透過率 T を計算することによって、マスクパターンの遮光性を最大化することができる。また、マスクパターンが複雑な形状を有する場合には、該マスクパターンを単純な形状を有する複数のパターンに分割して、各パターン毎に透過光の強度が回折光の強度と等しくなるように、位相シフターの透過率 T を計算することによって、マスクパターン全体に亘って遮光性を最大化することができる。

尚、第 1 の実施形態において、本発明のイメージ強調法の原理を考慮してマスクパターンの実効的な遮光性を最大化する場合には、 $T = I_c(L) / I_o(L)$ の関係に基づいて位相シフターの透過率 T を決定すればよいが、マスクパターンの実効的な遮光性を完全遮光膜よりなるマスクパターンよりも高くするだけならば、 $T = I_c(L) / I_o(L)$ の関係がほぼ満たされるように位相シフターの透過率 T を決定してもよい。具体的には、完全遮光膜を位相シフターに置き換えてもマスクパターンの遮光性が向上しなくなるのは、 $T = I_c(L) / I_o(L)$ の関係から得られる最適な透過率 T の 4 倍以上の透過率を有する位相シフターをマスクパターンとして設けた場合である。この理由について以下に説明する。前述のように、線幅 L 、透過率 T の位相シフターよりなるマスクパターンを有するイメージ強調マスクによって被露光材料上におけるマスクパターンの中心と対応する位置に生じる光強度 $I_h(L, T)$ は、

$$I_h(L, T) = ((I_c(L))^{0.5} - (T \times I_o(L))^{0.5})^2$$

の関係を用いて見積もることができる（但し、 $I_c(L)$ はマスクパターン回折光の光強度であり、 $I_o(L)$ はシフター透過光の光強度である）。ここで、 $I_c(L)$ と $T \times I_o(L)$ との重ね合わせは干渉性の重ね合わせなので、各光強度を位相空間上で足し合わせる必要がある。そのため、各光強度を位相空間上の値に変換するため、各光強度の平方根をとっている。そして、マスクパターン回折光及びシフター透過光のそれぞれの位相を考慮して各光強度の平方根を足し合

わせた結果が位相空間上での各光強度の重ね合わせになり、さらに、その結果を通常の光強度に換算するために2乗している。

前述のように、 $I_h(L, T)$ つまり $((I_c(L))^{0.5} - (T \times I_o(L))^{0.5})$ の2乗が最小になるときには、言い換えると、マスクパターンによる遮光効果が最も高くなるときには、 $I_c(L) = T \times I_o(L)$ が成り立つので、位相シフターの最適な透過率 T （以下、最適透過率 T_b とする）を、

$$T_b = I_c(L) / I_o(L)$$

により求めることができる。

一方、シフター透過光が過剰になって、マスクパターンの実効的な遮光性が完全遮光膜よりなるマスクパターンと同じになるまで低下する条件は、 $I_h(L, T) = I_c(L)$ つまり、

$$-((I_c(L))^{0.5} - (T \times I_o(L))^{0.5}) = (I_c(L))^{0.5}$$

であると考えることができる。このとき、

$$(T \times I_o(L))^{0.5} = 2 \times (I_c(L))^{0.5}$$

であるので、

$$T \times I_o(L) = 4 \times (I_c(L))$$

が成り立つ。すなわち、シフター透過光の光強度がマスクパターン回折光の光強度の4倍に達してしまうと、マスクパターンの実効的な遮光性が完全遮光膜よりなるマスクパターンと同じになってしまう。この条件を満たす位相シフターの透過率 T （以下、限界透過率 T_w とする）は、

$$T_w = 4 \times I_c(L) / I_o(L) = 4 \times T_b$$

により求めることができる。従って、最適透過率 T_b の4倍以上の透過率を有する位相シフターを完全遮光膜に代えてマスクパターンとして設けた場合、マスクパターンの実効的な遮光性が完全遮光膜よりなるマスクパターンよりも低下する。言い換えると、位相シフターの透過率を最適透過率 T_b の4倍以下にすれば、完全遮光膜に代えて位相シフターをマスクパターンとして設けることにより、マ

スクパターンの実効的な遮光性を向上させることができる。

図14(a)～(c)は、図10に示すイメージ強調マスクを用いた露光において位相シフターの透過率 T 及びマスクパターンの線幅 L を色々変化させた場合に $I_h(L, T) = I_c(L)$ が成り立つ条件を示している。ここで、図14(a)～(c)のそれぞれにおいて、前述の $T_w = 4 \times I_c(L) / I_o(L)$ の関係を表すグラフ(図中では T_w を T と表している)を重ね書きしている。尚、図14(a)～(c)に示すシミュレーション結果はそれぞれ異なる露光光源を用いて得られたものであり、図14(a)に示すシミュレーション結果は円形の光源を用いた通常露光により得られたものであり、図14(b)に示すシミュレーション結果は輪帯状の光源を用いた輪帯露光により得られたものであり、図14(c)に示すシミュレーション結果は対角座標上の4点に位置する光源を用いた四重極露光により得られたものである。また、その他のシミュレーション条件は、露光光の波長 $\lambda = 0.193 \mu m$ 、露光機の投影光学系の開口率 $NA = 0.6$ である。

図14(a)～(c)に示すように、位相シフターの透過率 T 及びマスクパターンの線幅 L に対する、 $I_h(L, T) = I_c(L)$ が成り立つ条件の依存性は、露光光源の形状によって若干異なっているが、 $I_h(L, T) = I_c(L)$ が成り立つ条件は露光光源の形状に関わらず $T = 4 \times I_c(L) / I_o(L)$ の関係で正確に表すことができる。

以上の説明において、マスクパターンの任意の線幅 L に対して位相シフターの限界透過率 T_w を求めたが、逆に、位相シフターの所定の透過率 T_o に対してマスクパターンの限界線幅 L_o を求めることもできる。具体的には、 $I_c(L) / I_o(L)$ はマスクパターンの線幅 L の増加と共に減少するので、位相シフターの所定の透過率 T_o に対して、 $I_c(L) / I_o(L)$ が $T_o / 4$ となる線幅 L を限界線幅 L_o とすると、限界線幅 L_o 以上の線幅を有するマスクパターンにおいては遮光膜に代えて位相シフターを用いる方がマスクパターンの実効的な遮光

性が低下することになる。従って、任意のレイアウトを有するマスクパターンにおいて所定の透過率 T_0 を有する位相シフターを設ける場合、 $I_c(L)/I_o(L) = T_0/4$ の関係から定まる限界線幅 L_0 以下の線幅を有するマスクパターン部分には位相シフターを設けると共に、限界線幅 L_0 以上の線幅を有するマスクパターン部分には遮光膜を設けることが好ましい。このようにすると、マスクパターン全体が遮光膜によって形成されている場合と比べてマスクパターン全体の実効的な遮光性を向上させることができる。尚、位相シフターの配置と遮光膜の配置とを切り替える寸法は、必ずしも $I_c(L)/I_o(L) = T_0/4$ の関係から定まる限界線幅 L_0 である必要はなく、限界線幅 L_0 以下の任意の線幅であってもよい。

また、以上の説明において、最適透過率 T を、 $T_b = I_c(L)/I_o(L)$ により求めると共に、限界透過率 T_w を、 $T_w = 4 \times I_c(L)/I_o(L) = 4 \times T_b$ により求めたが、より一般的な状況に対応して、位相シフターの透過率 T を次のように定めても良い。すなわち、被露光材料上におけるマスクパターンの中心と対応する位置に生じる光強度 I_h を、マスクパターン回折光の強度 I_c の $1/D$ まで低減させたい場合、

$$\begin{aligned} -((I_c)^{0.5} - (T \times I_o))^{0.5} &< (I_c/D)^{0.5} \\ &< ((I_c)^{0.5} - (T \times I_o))^{0.5} \end{aligned}$$

が成り立つような透過率 T を用いればよい。この関係式から透過率 T の許容範囲として、

$$\begin{aligned} (I_c/I_o) \times ((D - D^{0.5})/D) \times ((D - D^{0.5})/D) &< T \\ &< (I_c/I_o) \times ((D + D^{0.5})/D) \times ((D + D^{0.5})/D) \end{aligned}$$

が得られる。具体的には、 $D = 3$ の場合、透過率 T の許容範囲は (I_c/I_o) の 0.18 倍以上で且つ 2.5 倍以下である。また、 $D = 5$ の場合、透過率 T の許容範囲は (I_c/I_o) の 0.31 倍以上で且つ 2.1 倍以下である。また、 $D = 10$ の場合、透過率 T の許容範囲は (I_c/I_o) の 0.48 倍以上で且

つ1. 7倍以下である。実用的には必ずしも全てのマスクパターンの遮光性を最大にする必要はないので、位相シフターの透過率 T が (I_c/I_o) の $1/3$ 倍程度以上で且つ2倍程度以下の値であればマスクパターンの遮光性が十分に向上する。

また、例えば異なる透過率を有する2種類の位相シフターをマスクパターンとして用いることができる場合、いずれの透過率を有する位相シフターによって、より高い遮光性を実現できるかを、次のような方法によって判断することができる。すなわち、2種類の位相シフターの透過率がそれぞれ T_1 及び T_2 ($T_1 > T_2$)である場合、透過率 T_1 の位相シフターを用いることにより、透過率 T_2 の位相シフターを用いるよりも高い遮光性が得られる条件は、

$$(I_c^{0.5} - (T_1 \times I_o)^{0.5}) \times (I_c^{0.5} - (T_1 \times I_o)^{0.5}) \\ < (I_c^{0.5} - (T_2 \times I_o)^{0.5}) \times (I_c^{0.5} - (T_2 \times I_o)^{0.5})$$

である。この式を整理すると、

$$I_c / I_o > (T_1^{0.5} + T_2^{0.5}) \times (T_1^{0.5} + T_2^{0.5}) / 2$$

が得られる。従って、

$$I_c / I_o > (T_1^{0.5} + T_2^{0.5}) \times (T_1^{0.5} + T_2^{0.5}) / 2$$

が成り立つマスクパターン部分においては透過率 T_1 の位相シフターを選択し、

$$I_c / I_o \leq (T_1^{0.5} + T_2^{0.5}) \times (T_1^{0.5} + T_2^{0.5}) / 2$$

が成り立つマスクパターン部分においては透過率 T_2 の位相シフターを選択すればよい。

また、第1の実施形態に係るパターン形成方法、つまり第1の実施形態に係るフォトリソグラフィを用いたパターン形成方法において、レジスト膜としてはポジ型のものを用いてもよいし、又はネガ型のものを用いてもよい。ポジ型レジスト膜を用いる場合、露光光を照射されたポジ型レジスト膜を現像して、ポジ型レジスト膜におけるマスクパターンと対応する部分以外の他の部分を除去することにより、マスクパターン形状のレジストパターンを形成できる。ネガ型レジスト膜を用

いる場合、露光光を照射されたネガ型レジスト膜を現像して、ネガ型レジスト膜におけるマスクパターンと対応する部分を除去することにより、マスクパターン形状の開口部を有するレジストパターンを形成できる。ポジ型レジスト膜を用いる場合であっても、ネガ型レジスト膜を用いる場合であっても、マスクパターン幅 L が $0.4 \times \lambda / NA$ 程度よりも小さくなると、従来と比べてレジストパターンの寸法精度を大きく向上させることができる。

第2の実施形態

以下、本発明の第2の実施形態に係るフォトマスク、その作成方法及びそのフォトマスクを用いたパターン形成方法について、図面を参照しながら説明する。

第2の実施形態の特徴は、第1の実施形態と同様に、所望のパターンと対応するマスクパターンを遮光膜を用いて作成した場合において、露光時にマスクパターンによって被露光材料（具体的にはレジスト膜）に転写される光強度分布における光強度が十分に低下しない領域と対応する遮光膜部分を位相シフターで置き換えることによりマスクパターンを作成し、そのマスクパターンを有するフォトマスクを用いて露光を行なうことである。

また、第2の実施形態が第1の実施形態と異なっている点は次の通りである。すなわち、第1の実施形態においては、シフター透過光の強度を位相シフターの透過率により制御するために、マスクパターンとして設けられる位相シフターの透過率が複数存在していた。それに対して、第2の実施形態においては、マスクパターンとして設けられる位相シフターは全て同じ透過率を有していると共に、シフター透過光の強度を、位相シフターを部分的に遮光膜によって覆うことにより制御する。

図15(a)は、第2の実施形態における形成対象となる所望のパターン（レジストパターン）の設計レイアウトの一例を示している。図15(a)に示すように、パターン70の幅は $0.13 \mu m$ である。尚、パターン70の設計レイア

ウトは、図 5 (a) に示す第 1 の実施形態における形成対象となるパターン 20 の設計レイアウトと同じである。

図 15 (b) は、図 15 (a) に示すパターンを形成するために用いられる、第 2 の実施形態に係るフォトマスクの平面図を示している。図 15 (b) に示すように、第 2 の実施形態に係るフォトマスクは、透過性基板 80 上に、図 15 (a) に示すパターンと対応するマスクパターン 90 が形成されてなる。マスクパターン 90 は $0.13 \times M [\mu m]$ (M : 露光機の縮小投影光学系の倍率) の寸法 (実寸) を有している。また、マスクパターン 90 は、クロム膜等の遮光膜よりなる遮光部 91 と、該遮光膜に設けられた開口部に配置された位相シフター 92 とを有している。

図 15 (b) に示す第 2 の実施形態に係るフォトマスクと、図 5 (b) に示す第 1 の実施形態に係るフォトマスクとを比較すると、次のことが分かる。すなわち、第 2 の実施形態においては、第 1 の実施形態で高い透過率を有する位相シフター (第 2 の位相シフター 43) が設けられいた領域に対しては、遮光部 91 となる遮光膜に大きな開口部を設けて、該開口部を位相シフター 92 としている。また、第 1 の実施形態で低い透過率を有する位相シフター (第 1 の位相シフター 42) が設けられいた領域に対しては、遮光部 91 となる遮光膜に小さな開口部を設けて、該開口部を位相シフター 92 としている。

図 16 (a) ~ (c) は、第 2 の実施形態に係るパターン形成方法、具体的には、図 15 (b) に示すフォトマスクを用いた露光によるパターン形成方法の各工程を示す断面図である。まず、図 16 (a) に示すように、基板 100 の上に金属膜又は絶縁膜等よりなる被加工膜 101 を形成した後、被加工膜 101 の上にポジ型のレジスト膜 102 を形成する。その後、図 16 (b) に示すように、透過性基板 80 上にマスクパターン 90 が形成されてなる第 2 の実施形態に係るフォトマスク (図 15 (b) 参照) を介してレジスト膜 102 に対して露光光 103 を照射する。これにより、レジスト膜 102 におけるマスクパターン 90 と

対応する部分が非露光部 102a となり、レジスト膜 102 におけるその他の部分が露光部 102b となる。その後、図 16 (c) に示すように、レジスト膜 102 を現像することによって非露光部 102a よりなるレジストパターン 104 を形成する。

図 17 (a) は、図 15 (b) に示すフォトマスクによってレジスト膜 102 に投影される光強度分布のシミュレーション結果を示している。シミュレーション条件は、露光光 103 の波長 $\lambda = 193 \text{ nm}$ 、露光機の投影光学系の開口数 $NA = 0.6$ 、露光機の干渉度 $\sigma = 0.8$ である。このとき、図 15 (b) に示すマスクパターン 90 の寸法について、 $0.13 \times M [\mu\text{m}] \div 0.4 \times M \times \lambda / NA$ の関係が成り立つ。尚、図 17 (a) においては、2次元の相対座標系における相対光強度の等高線を用いて光強度分布を示している。

図 17 (a) に示す第 2 の実施形態のシミュレーション結果と、図 7 (a) に示す第 1 の実施形態のシミュレーション結果とを比較すると、次のことがわかる。すなわち、第 2 の実施形態に係るフォトマスクを用いた場合、マスクパターンにおける遮光膜によっては十分な遮光性が得られない部分に、より大きな開口部を設けて該開口部に位相シフターを設けることにより、マスクパターン全体に亘って十分な遮光性を実現できるので、第 1 の実施形態と同様に、所望の形状により近い形状を有するレジストパターンを形成することができる。

図 17 (b) は図 17 (a) の AA' 線に沿った光強度分布のシミュレーション結果を示しており、図 17 (c) は図 17 (a) に示す光強度分布のシミュレーション結果からレジストパターン 104 の形状を予測した結果を示している。図 17 (b) に示すように臨界強度が 0.3 であるとする、図 17 (a) に示す光強度分布における臨界強度値の分布形状がマスクパターン 90 の形状とほぼ一致する結果、図 17 (c) に示すようにほぼ所望の形状（破線で示す形状）を有するレジストパターン 104（斜線部）を形成できる。

以上に説明したように、第 2 の実施形態によると、フォトマスク上のマスクパ

ターンに位相シフターを設けることにより、シフター透過光によってマスクパターン回折光を打ち消している。このため、マスクパターンの遮光性を、完全遮光膜のみからなるマスクパターンよりも向上させることができるので、1枚のフォトマスクを用いた露光によって、任意の寸法又は形状を有するパターンを形成することができる。

以下、第2の実施形態が第1の実施形態と比べて優れている点について説明する。前述のように、理論的には、所望のパターンと対応するマスクパターンを遮光膜を用いて作成した場合において、遮光膜における実効的な遮光性が低下してしまう部分を、最適な透過率を有する位相シフターによって置き換えることによって、マスクパターンの全体に亘って実効的な遮光性を向上できる。この場合、位相シフターを、露光光に対して透過性材料となる石英等よりなる透過性基板上の堆積膜として形成する必要があると共に、透過性基板上の異なる位置に異なる透過率を有する材料よりなる堆積膜を設ける必要がある。しかし、これは、マスク製造上の手間及びコストを考慮すると困難である。一方、堆積膜の材料に代えて堆積膜の厚みにより位相シフターの透過率を制御しようとしても、堆積膜の厚みは、位相差180度と対応する光路差を生じる厚みに限定される。このため、単一材料の堆積膜の厚みを変化させることにより、位相シフターの透過率をマスクパターンの各部分で変更することも困難である。それに対して、第2の実施形態においては、シフター透過光を、位相シフターの透過率ではなく、マスクパターンに設けられた開口部（具体的にはマスクパターンの外形形状を有する遮光膜に設けられた開口部）の大きさによって制御するので、開口部に配置される位相シフターの透過率を単一にすることができる。もちろん、このとき、位相シフターの透過率が複数存在していてもよい。

以下、第2の実施形態に係るフォトマスクのマスクパターンに設けられる開口部の幅と、マスクパターンによって被露光材料上に投影される光強度分布との関係について詳しく説明する。尚、第2の実施形態においても、マスクパターン回

折光をシフター透過光によって打ち消すという、イメージ強調法の原理を用いている点は第1の実施形態と共通である。また、第1の実施形態においては、マスクパターン線幅に対して位相シフターの透過率を適切に設定したのに対して、第2の実施形態においては、マスクパターン線幅に対して開口部幅を適切に設定してやる。

図18(a)は、遮光膜と、該遮光膜に設けられ且つ位相シフターとなる開口部とからなるマスクパターンを有するフォトマスクの平面図である。図18(a)に示すように、透過性基板110上に、マスクパターン形状にパターン化されており且つ位相シフターとなる透過性膜111が形成されていると共に、透過性膜111を覆うようにクロム膜等の遮光膜112が形成されている。また、遮光膜112には開口部113が透過性膜111を露出させるように設けられており、それにより開口部113は位相シフターとして機能する。尚、図18(a)において、透過性膜111の透過率(T)は50%であり、マスクパターン線幅はLであり、開口部113の幅(以下、開口部幅と称する)はSである。

図18(b)は、図18(a)に示すフォトマスクを用いて露光を行なっている様子を示している。図18(b)に示すように、露光光114は、透過性基板110におけるマスクパターン周辺を透過して第1の透過光115となると共に開口部113を透過して第2の透過光116となる。

図19(a)は、図18(a)に示すフォトマスクを用いた露光において開口部幅Sを色々変化させた場合に被露光材料上における図18(a)のAA'線と対応する位置に転写される光強度分布のシミュレーション結果を示している。尚、シミュレーション条件は、露光光の波長 $\lambda = 0.193 \mu\text{m}$ 、露光機の投影光学系の開口率 $NA = 0.6$ 、露光機の干渉度 $\sigma = 0.8$ 、マスクパターン線幅 $L = 0.1 \mu\text{m}$ である。また、AA'線上の点Oはマスクパターン中心に位置している。

図19(a)に示すように、開口部幅Sが大きくなるに従って、被露光材料上

におけるマスクパターン中心Oと対応する位置（横軸の0）の光強度が低下しており、光強度分布の形状が良くなっている。また、開口部幅Sが0の場合（マスクパターンが完全遮光膜よりなる場合）に、光強度分布の形状が最悪となっている。すなわち、図9（a）に示すシミュレーション結果と比べると、マスクパターンに設ける開口部の幅を増大させることは、マスクパターンに設ける位相シフターの透過率を増大させることと同様の効果をもたらすことがわかる。

図19（b）は、図18（a）に示すフォトマスクを用いた露光においてマスクパターン線幅L及び開口部幅Sを色々変化させた場合に被露光材料上における図18（a）の点Oと対応する位置に生じる光強度のシミュレーション結果を、マスクパターン線幅L及び開口部幅Sをそれぞれ縦軸及び横軸に取って光強度の等高線で表した様子を示している。

図19（b）において網掛け模様で示している領域が、マスクパターンの実効的な遮光性を最大にする、マスクパターン線幅Lと開口部幅Sとの組み合わせ条件を示している。すなわち、この組み合わせ条件が、マスクパターン回折光及びシフター透過光のそれぞれの光強度が相殺される条件である。従って、この組み合わせ条件に基づき、各マスクパターン線幅Lに対して、各マスクパターンの実効的な遮光性が最大になる開口部幅Sを定めていくことにより、マスクパターンによって被露光材料上に投影される光強度分布の形状を所望の形状に近づけてやることができる。

ところで、図18（a）に示すフォトマスクにおいては、開口部幅Sがマスクパターン線幅Lに等しい場合にも（位相シフターとなる透過性膜111の上に遮光膜112が設けられていない場合にも）、シフター透過光の最大値は透過性膜111の透過率によって制限されることになる。一方、第2の実施形態においては、位相シフターの透過率の最大値を抑制する特別な理由がない限り、位相シフターの透過率は高い方が好ましい。

そこで、第2の実施形態においては、図18（a）に示すようなフォトマスク

に代えて、図20(a)に示すようなフォトマスク、つまり位相差180度と対応する光路差を生じる厚みだけ透過性基板を彫り込むことによって形成される位相シフターが設けられたフォトマスクを用いる方が好ましい。この場合、位相シフターの透過率は、実質的に透過性基板の透過率と等しくなる。尚、本明細書においては、透過性基板の透過率を透過率の基準(1.0)として用いている。

図20(a)は、遮光膜と、該遮光膜に設けられ且つ位相シフターとなる開口部とからなるマスクパターンを有するフォトマスクの平面図である。図20(a)に示すように、透過性基板120上に、マスクパターンの外形形状を有するクロム膜等の遮光膜121が形成されている。また、遮光膜121には開口部123が設けられていると共に、透過性基板120における開口部123の下側には、位相シフターとなる彫り込み部122が形成されている。尚、図20(a)において、マスクパターン線幅はLであり、開口部123の幅(以下、開口部幅と称する)はSである。

図20(b)は、図20(a)に示すフォトマスクを用いて露光を行なっている様子を示している。図20(b)に示すように、露光光124は、透過性基板120におけるマスクパターン周辺を透過して第1の透過光125となると共に開口部123を透過して第2の透過光126となる。

図21(a)は、図20(a)に示すフォトマスクを用いた露光において開口部幅Sを色々変化させた場合に被露光材料上における図20(a)のAA'線と対応する位置に転写される光強度分布のシミュレーション結果を示している。尚、シミュレーション条件は図19(a)の場合と同じである。また、AA'線上の点Oはマスクパターン中心に位置している。

図21(a)に示すように、開口部幅Sが大きくなるに従って、被露光材料上におけるマスクパターン中心Oと対応する位置(横軸の0)の光強度が低下しており、光強度分布の形状が良くなっている。また、開口部幅Sが0の場合(マスクパターンが完全遮光膜よりなる場合)に、光強度分布の形状が最悪となってい

る。さらに、図19(a)に示すシミュレーション結果と比べると、位相シフターの透過率が高くなったことに起因して、マスクパターンの遮光性がより向上している。

図21(b)は、図20(a)に示すフォトマスクを用いた露光においてマスクパターン線幅L及び開口部幅Sを色々変化させた場合に被露光材料上における図20(a)の点Oと対応する位置に生じる光強度のシミュレーション結果を、マスクパターン線幅L及び開口部幅Sをそれぞれ縦軸及び横軸に取って光強度の等高線で表した様子を示している。図21(b)に示すシミュレーション結果と図19(b)に示すシミュレーション結果とを比べると、図21(b)においては、位相シフターの透過率が高くなったことに起因して、より小さいマスクパターン線幅Lに対してもマスクパターンの実効的な遮光性が高く保たれていることが分かる。

図21(b)において網掛け模様で示している領域は、マスクパターンの実効的な遮光性を最大にする、マスクパターン線幅Lと開口部幅Sとの組み合わせ条件を示している。すなわち、この組み合わせ条件（以下、遮光性最大化条件と称する）が、マスクパターン回折光及びシフター透過光のそれぞれの光強度が相殺される条件である。

図21(b)に示すように、遮光性最大化条件においては、マスクパターン線幅Lが小さくなるほど開口部幅Sが大きくなる関係が成り立っている。すなわち、第2の実施形態においては、マスクパターン線幅Lが十分に大きい場合には、開口部幅Sを0とし、マスクパターン線幅Lが小さくなるに従って図21(b)に示す遮光性最大化条件に従って開口部幅Sを大きくしていき、マスクパターン線幅Lがある程度小さくなると、マスクパターンを位相シフターのみで構成することにより、言い換えると、マスクパターン線幅Lによってマスクパターンの構造を連続的に変化させることにより、マスクパターンの遮光性を常に最適化することができる。

図 2 1 (c) は、前述のようにマスクパターンの遮光性が最適化されたフォトマスク（図中の「最適化されたマスク」）を用いた露光においてマスクパターン線幅 L を色々変化させた場合に被露光材料上におけるマスクパターン中心と対応する位置に生じる光強度のシミュレーション結果を示している。尚、図 2 1 (c) には、比較のため、クロム膜等の完全遮光膜のみからなるマスクパターンが設けられた従来のフォトマスク（図中の「クロムマスク」）を用いた露光においてマスクパターン線幅 L を色々変化させた場合に被露光材料上におけるマスクパターン中心と対応する位置に生じる光強度のシミュレーション結果も示している。

図 2 1 (c) に示すように、クロムマスクを用いた露光においては、マスクパターン線幅 L が $0.2 \mu\text{m}$ 程度以下になると、マスクパターンの遮光性が低下し始める。それに対して、最適化されたマスクを用いた露光においては、マスクパターン線幅 L が $0.1 \mu\text{m}$ 程度以下になるまで、マスクパターンの遮光性の低下を防止することができる。

ところで、図 1 9 (b) 又は図 2 1 (b) においては、色々なマスクパターン線幅 L 及び開口部幅 S を用いて被露光材料上に転写される光強度分布を実際に計算することにより、マスクパターンの実効的な遮光性を最大にする、マスクパターン線幅 L 及び開口部幅 S の組み合わせ条件（遮光性最大化条件）を求めている。しかしながら、この方法で遮光性最大化条件を求めようとすると計算時間が非常に長くなるので、例えば任意のマスクパターン線幅 L に対する最適な開口部幅 S を求めることが困難になる。

そこで、次に、本願発明者が見出した、遮光性最大化条件の簡単な計算方法、具体的には任意のマスクパターン線幅 L に対して最適な開口部幅 S を求める簡単な方法（以下、マスクパターン重ね合わせ法と称する）について説明する。但し、以下の説明において、位相シフターの透過率は、マスク基板となる透過性基板の透過率（1.0）と同じであるとして計算結果等を示していくが、位相シフターの透過率が透過性基板の透過率と同じでない場合には、透過率の差に基づいて

、開口部を透過するシフター透過光の強度を換算すればよい。

図 2 2 は、本発明のマスクパターン重ね合わせ法の原理を、開口部幅 S のマスクエンハンサーよりなる線幅 L のマスクパターンを有するイメージ強調マスクの場合について示した模式図である。尚、以下の説明においては、マスクパターン内の遮光膜に位相シフターとなる開口部が設けられた本発明の構造をマスクエンハンサーと称する。

図 2 2 に示すように、開口部幅 S のマスクエンハンサーよりなる線幅 L のマスクパターンを有するフォトマスク（イメージ強調マスク）を用いた露光において、被露光材料上におけるマスクパターン中心と対応する位置に生じる光強度を $I_e(L, S)$ とする。また、イメージ強調マスクのマスクエンハンサーに代えて完全遮光膜がマスクパターンとして設けられたフォトマスク（遮光マスク）を用いた露光において、被露光材料上におけるマスクパターン中心と対応する位置に生じる光強度を $I_c(L)$ とする。また、イメージ強調マスクの開口部（透過率 1.0 の位相シフター）に代えて通常の透光部が設けられ、且つイメージ強調マスクの透光部に代えて完全遮光膜よりなる遮光部が設けられたフォトマスク（透過マスク）を用いた露光において、被露光材料上におけるマスクパターン中心と対応する位置に生じる光強度を $I_o(S)$ とする。

このとき、イメージ強調マスクにおいて、被露光材料上におけるマスクパターン中心と対応する位置に生じるマスクパターン回折光の強度は $I_c(L)$ に相当すると共に、被露光材料上におけるマスクパターン中心と対応する位置に生じるシフター透過光の光強度は $I_o(S)$ に相当する。従って、光強度 $I_e(L, S)$ は、光強度 $I_c(L)$ 及び光強度 $I_o(S)$ をそれぞれ位相空間上での光強度に換算して重ね合わせ、その結果を 2 乗した値によって近似することができる。すなわち、

$$I_e(L, S) = ((I_c(L))^{0.5} - (I_o(S))^{0.5})^2$$

である。

従って、イメージ強調マスクにおいて、 $I_e(L, S)$ が最小となる条件つまり遮光性最大化条件は、

$$I_c(L) = I_o(S)$$

である。すなわち、遮光性最大化条件として、 $I_c(L) = I_o(S)$ を満たすマスクパターン線幅 L 及び開口部幅 S を求めればよい。

図 23 (a) ~ (c) は、図 22 に示すイメージ強調マスクを用いた露光においてマスクパターン線幅 L 及び開口部幅 S を色々変化させた場合に被露光材料上におけるマスクパターンの中心と対応する位置に生じる光強度 $I_e(L, S)$ のシミュレーション結果を、開口部幅 S 及びマスクパターン線幅 L をそれぞれ縦軸及び横軸に取って光強度の等高線で表した様子を示している。ここで、図 23 (a) ~ (c) のそれぞれにおいて、前述の $I_c(L) = I_o(S)$ の関係を表すグラフを重ね書きしている。尚、図 23 (a) ~ (c) に示すシミュレーション結果はそれぞれ異なる露光光源を用いて得られたものであり、図 23 (a) に示すシミュレーション結果は円形の光源を用いた通常露光により得られたものであり、図 23 (b) に示すシミュレーション結果は輪帯状の光源を用いた輪帯露光により得られたものであり、図 23 (c) に示すシミュレーション結果は対角座標上の 4 点に位置する光源を用いた四重極露光により得られたものである。また、その他のシミュレーション条件は、露光光の波長 $\lambda = 0.193 \mu\text{m}$ 、露光機の投影光学系の開口率 $NA = 0.6$ である。

図 23 (a) ~ (c) に示すように、マスクパターン線幅 L 及び開口部幅 S に対する光強度 $I_e(L, S)$ の依存性は、露光光源の形状によって若干異なっているが、光強度 $I_e(L, S)$ が最小となる条件は露光光源の形状に関わらず $I_c(L) = I_o(S)$ の関係で正確に表すことができる。

図 24 は、本発明のマスクパターン重ね合わせ法の原理を、開口部幅 S のマスクエンハンサーよりなる正形状（1 辺の長さが L ）のマスクパターンを有するイメージ強調マスクの場合について示した模式図である。図 24 に示すイメージ

強調マスクにおいても、被露光材料上におけるマスクパターン中心と対応する位置に生じるマスクパターン回折光の光強度は $I_c(L)$ に相当すると共に、被露光材料上におけるマスクパターン中心と対応する位置に生じるシフター透過光の光強度は $I_o(S)$ に相当する。従って、図24に示すイメージ強調マスクにおいても、 $I_e(L, S)$ を最小とするマスクパターン幅 L 及び開口部幅 S は、 $I_c(L) = I_o(S)$ の関係から求めることができる。

図25(a)～(c)は、図24に示すイメージ強調マスクを用いた露光においてマスクパターン幅 L 及び開口部幅 S を色々変化させた場合に被露光材料上におけるマスクパターン中心と対応する位置に生じる光強度 $I_e(L, S)$ のシミュレーション結果を、開口部幅 S 及びマスクパターン幅 L をそれぞれ縦軸及び横軸に取って光強度の等高線で表した様子を示している。ここで、図25(a)～(c)のそれぞれにおいて、前述の $I_c(L) = I_o(S)$ の関係を表すグラフを重ね書きしている。尚、図25(a)～(c)に示すシミュレーション結果はそれぞれ異なる露光光源を用いて得られたものであり、図25(a)に示すシミュレーション結果は円形の光源を用いた通常露光により得られたものであり、図25(b)に示すシミュレーション結果は輪帯状の光源を用いた輪帯露光により得られたものであり、図25(c)に示すシミュレーション結果は対角座標上の4点に位置する光源を用いた四重極露光により得られたものである。また、その他のシミュレーション条件は、露光光の波長 $\lambda = 0.193 \mu m$ 、露光機の投影光学系の開口率 $NA = 0.6$ である。

図25(a)～(c)に示すように、マスクパターン幅 L 及び開口部幅 S に対する光強度 $I_e(L, S)$ の依存性は、露光光源の形状によって若干異なっているが、光強度 $I_e(L, S)$ が最小となる条件は露光光源の形状に関わらず $I_c(L) = I_o(S)$ の関係で正確に表すことができる。

すなわち、本発明のマスクパターン重ね合わせ法の適用が可能なマスクパターンの形状は特に限定されるものではない。

具体的には、マスクエンハンサーよりなる任意形状のマスクパターンを有するイメージ強調マスクにおける、マスクパターンの実効的な遮光性を最大にする開口部幅の計算方法は次の通りである。

(1) イメージ強調マスクのマスクエンハンサーに代えて完全遮光膜がマスクパターンとして設けられた遮光マスクを用いた露光において被露光材料上におけるマスクパターンの中心付近と対応する位置 r に生じる光強度 $I_c(r)$ を計算する。

(2) 開口部を透過する光の強度が $I_c(r)$ と等しくなるように開口部幅を求めると共に、該開口部に位相シフターを設ける。

尚、開口部幅をマスクパターン幅よりも大きくすることはできないので、前述の方法により求められた開口部幅がマスクパターン幅を超えてしまう場合には、マスクパターン全体を位相シフターとする。また、マスクパターン全体を位相シフターとしても遮光性が不十分な場合、オリジナルのマスクパターンの寸法を拡大して、再び前述の方法により開口部幅を求めればよい。

また、以上の説明においては単純な形状を有するマスクパターンを対象としてきたが、マスクパターンが複雑な形状を有する場合には、該マスクパターンを単純な形状を有する複数のパターンに分割して、各パターン毎に本発明のマスクパターン重ね合わせ法を適用すればよい。これにより、分割された各パターン毎に、最適な開口部幅が定まる。

以上に説明したように、第2の実施形態に係るフォトマスクにおいては、マスクパターン回折光の強度を計算した後、シフター透過光の強度がマスクパターン回折光の強度と等しくなるように、マスクエンハンサーの開口部幅を計算することによって、マスクパターンの遮光性を最大化することができる。また、マスクパターンが複雑な形状を有する場合には、該マスクパターンを単純な形状を有する複数のパターンに分割して、各パターン毎に透過光の強度が回折光の強度と等しくなるように開口部幅を計算することによって、マスクパターン全体に亘って

遮光性を最大化することができる。

ところで、第2の実施形態においては、シフター透過光を発生させるためのマスクエンハンサーの開口部の形状は、第1の実施形態の位相シフターの形状と異なり、マスクパターンの形状と一致させる必要はない。言い換えると、マスクエンハンサーの開口部の形状を、マスクパターン内に収まる範囲内で任意に設定することができる。また、本発明のイメージ強調法においては、第1の実施形態における位相シフターの透過率を変化させてシフター透過光を制御する方法は、第2の実施形態におけるマスクエンハンサーの開口部の大きさを変化させてシフター透過光を制御する方法の1つとして考えることができる。すなわち、所定の透過率を有する位相シフターよりなる一のマスクパターンは、該所定の透過率より高い透過率を有する位相シフターとなる開口部が一のマスクパターンと同じ外形形状の遮光膜に設けられた他のマスクパターンによって代用することができる。さらに、一般化して言うと、所定の透過率と所定の形状及び寸法とを有する開口部を、所定の透過率と異なる透過率と所定の形状及び寸法と異なる形状及び寸法を有する開口部と等価的に置き換えることができる。但し、これが成り立つのは、マスクパターンの寸法が λ / NA の半分程度以下であることが条件である。ここで、重要な点は、微細なマスクパターンに設けられる開口部は、そこを透過する光の強度が同じであれば、開口部の形状によらず全く同じ光学的振る舞いをするということである。以下、このことを第2の実施形態で利用した場合に生じる効果について説明する。

図26(a)は線幅 L 、透過率 T の半透明膜よりなる半透明パターンを示している。ここで、 $L = 0.1 \mu m$ であるとする。

図26(b)～(d)はそれぞれ透過性基板に透過率1.0の開口部が設けられてなる開口パターンを示しており、図26(b)は線幅 L の領域の中央に幅 S ($S < L$)の1本ラインの開口部が設けられてなる開口パターンを示しており、図26(c)は線幅 L の領域に幅 $S/2$ の2本ラインの開口部が均等に設けられ

てなる開口パターンを示しており、図 2 6 (d) は面積 L の領域の中央に面積 S の正方形の開口部が設けられてなる開口パターンを示している。

図 2 6 (e) は、寸法 S を 0 から L まで変化させながら図 2 6 (b) ~ (d) のそれぞれに示す開口パターンに光を照射した場合における、開口部を透過した光の各開口パターン中心と対応する位置での光強度をシミュレーションで評価した結果を示している。尚、図 2 6 (e) においては、図 2 6 (a) に示す半透明パターンに光を照射した場合における、半透明膜を透過した光の半透明パターン中心と対応する位置での光強度が、各開口パターン中心と対応する位置での光強度と等しくなるときの半透明膜の透過率 T (縦軸) を用いて、各開口パターン中心と対応する位置での光強度を評価している。また、図 2 6 (e) において、各開口パターン中心と対応する位置での光強度を、開口面積率 S/L (横軸) をパラメータとする関数としてプロットしている。

図 2 6 (e) に示すように、各開口パターンと等価な半透明パターンにおける半透明膜の透過率 T (以下、等価透過率 T と称する) の開口面積率 S/L に対する依存性は、各開口パターンの形状によって若干異なっているが、いずれの開口パターンにおいても、等価透過率 T と開口面積率 S/L との間には強い相関関係があることが分かる。

図 2 7 (a) は、図 2 6 (a) に示す半透明パターンに光を照射した場合における半透明膜を透過した光の強度分布を、透過率 T を 0.5 としてシミュレーションで評価した結果を示している。図 2 7 (a) において、位置 0 (横軸の原点) は半透明パターンの中心と対応している。また、図 2 7 (a) において、光強度分布のフォーカス特性のシミュレーション結果も合わせて示している。尚、フォーカス特性は、ベストフォーカス位置と、ベストフォーカス位置からそれぞれ 0.15、0.30 及び 0.45 μm ずつデフォーカスした位置とについて評価している。

図 2 7 (b) ~ (d) は図 2 6 (b) ~ (d) のそれぞれに示す開口パターン

に光を照射した場合における開口部を透過した光の強度分布を、等価透過率 T を 0.5 としてシミュレーションで評価した結果を示している。このとき、図 26 (e) から分かるように、図 26 (b) に示す開口パターンにおける S は $0.068 \mu\text{m}$ であり、図 26 (c) に示す開口パターンにおける S は $0.070 \mu\text{m}$ であり、図 26 (d) に示す開口パターンにおける S は $0.069 \mu\text{m}$ である（但し、いずれの場合においても L は $0.10 \mu\text{m}$ である）。また、図 27 (b) ～ (d) において、位置 0（横軸の原点）は各開口パターンの中心と対応している。また、図 27 (b) ～ (d) において、光強度分布のフォーカス特性のシミュレーション結果も合わせて示している。尚、フォーカス特性は、ベストフォーカス位置と、ベストフォーカス位置からそれぞれ 0.15、0.30 及び 0.45 μm ずつデフォーカスした位置とについて評価している。

図 27 (b) ～ (d) に示すように、各開口パターンにおいては、その中心と対応する位置での光強度が一致していれば、その光学特性は全く同等であることが分かる。

また、マスクパターン回折光をシフター透過光によって打ち消す本発明のイメージ強調法においては、シフター透過光の実効的な強度だけを調整すればよく、その強度が同じであればシフター透過光を発生させる方法として最も実現が容易な方法を選べばよい。

さらに、開口面積率が同じであれば、開口部を透過するシフター透過光の強度の開口部形状に対する依存性は小さく、厳密ではないが、実用的にはシフター透過光の強度は開口面積率によってほぼ一意的に決定できる。

例えば、図 26 (e) に示すように、図 26 (b) ～ (d) に示す各開口パターンの等価透過率 T の開口面積率 S/L に対する依存性は、

$$T = 1.45 \times (S/L) - 0.45$$

によって近似的に表すことができる。この近似は、0.1 以下の低い透過率においては不正確であるが、0.2 以上の透過率においてはかなり正確である。但し

、上式において、 (S/L) の係数 (1.45) や定数 (0.45) は、露光光の波長やマスクパターン寸法に依存して変化する。

従って、第2の実施形態に係るフォトマスクにおいては、マスクパターン内における開口部形状は開口面積率が一定に保たれる範囲で任意に変形可能である。例えば、実際にマスクパターンを形成する場合、遮光膜と基板との密着度等を考慮すると、極端に細長い遮光膜パターンが生じることは好ましくない。このような場合、例えば半径 λ/NA の範囲の領域毎に開口部をその開口面積率が変化しないように分割して配置する方法等により、細長い遮光膜パターンが単独で存在しないようにすればよい。

尚、第2の実施形態において、本発明のイメージ強調法の原理を考慮してマスクパターンの実効的な遮光性を最大化する場合には、 $I_c(L) = I_o(S)$ の関係に基づいて開口部幅 S を決定すればよいが、マスクパターンの実効的な遮光性を完全遮光膜よりなるマスクパターンよりも高くするだけならば、 $I_c(L) = I_o(S)$ の関係がほぼ満たされるように開口部幅 S を決定してもよい。

具体的には、前述のように、開口部幅 S のマスクエンハンサーよりなる線幅 L のマスクパターンを有するイメージ強調マスクによって被露光材料上におけるマスクパターンの中心と対応する位置に生じる光強度 $I_e(L, S)$ は、

$$I_e(L, S) = \left((I_c(L))^{0.5} - (I_o(S))^{0.5} \right)^2$$

の関係を用いて見積もることができる（但し、 $I_c(L)$ はマスクパターン回折光の光強度であり、 $I_o(S)$ はシフター透過光の光強度である）。従って、シフター透過光が過剰になって、マスクパターンの実効的な遮光性が完全遮光膜よりなるマスクパターンと同じになるまで低下する条件は、 $I_e(L, S) = I_c(L)$ つまり、

$$- \left((I_c(L))^{0.5} - (I_o(S))^{0.5} \right) = (I_c(L))^{0.5}$$

であると考えることができる。このとき、

$$(I_o(S))^{0.5} = 2 \times (I_c(L))^{0.5}$$

であるので、

$$I_o(S) = 4 \times (I_c(L))$$

が成り立つ。すなわち、シフター透過光の光強度がマスクパターン回折光の光強度の4倍に達してしまうと、マスクパターンの実効的な遮光性が完全遮光膜よりなるマスクパターンと同じになってしまう。言い換えると、シフター透過光の光強度がマスクパターン回折光の光強度の4倍以下になるように開口部幅Sを設定することにより、マスクパターンの実効的な遮光性を、完全遮光膜よりなるマスクパターンよりも向上させることができる。

また、第2の実施形態において、より一般的な状況に対応して、開口部幅を次のように定めても良い。すなわち、被露光材料上におけるマスクパターン中心と対応する位置に生じる光強度 I_h を、マスクパターン回折光の強度 I_c の $1/D$ まで低減させたい場合、

$$\begin{aligned} -((I_c)^{0.5} - (I_o))^{0.5} &< (I_c/D)^{0.5} \\ &< ((I_c)^{0.5} - (I_o))^{0.5} \end{aligned}$$

が成り立つような開口部幅を用いればよい。具体的には、 $D=3$ の場合、 I_o （シフター透過光の光強度）が I_c の0.18倍以上で且つ2.5倍以下になるように開口部幅を設定する。また、 $D=5$ の場合、 I_o が I_c の0.31倍以上で且つ2.1倍以下になるように開口部幅を設定する。また、 $D=10$ の場合、 I_o が I_c の0.48倍以上で且つ1.7倍以下になるように開口部幅Sを設定する。実用的には必ずしも全てのマスクパターンの遮光性を最大にする必要はないので、 I_o が I_c の $1/3$ 倍程度以上で且つ2倍程度以下になるように開口部幅を設定すればマスクパターンの遮光性が十分に向上する。

また、第2の実施形態に係るパターン形成方法、つまり第2の実施形態に係るフォトマスクを用いたパターン形成方法において、レジスト膜としてはポジ型のものを用いてもよいし、又はネガ型のものを用いてもよい。ポジ型レジスト膜を用いる場合、露光光を照射されたポジ型レジスト膜を現像して、ポジ型レジスト

膜におけるマスクパターンと対応する部分以外の他の部分を除去することにより、マスクパターン形状のレジストパターンを形成できる。ネガ型レジスト膜を用いる場合、露光光を照射されたネガ型レジスト膜を現像して、ネガ型レジスト膜におけるマスクパターンと対応する部分を除去することにより、マスクパターン形状の開口部を有するレジストパターンを形成できる。ポジ型レジスト膜を用いる場合であっても、ネガ型レジスト膜を用いる場合であっても、マスクパターン幅 L が $0.4 \times \lambda / NA$ 程度よりも小さくなると、従来と比べてレジストパターンの寸法精度を大きく向上させることができる。

第2の実施形態の変形例

以下、本発明の第2の実施形態に係るフォトマスク、その作成方法及びそのフォトマスクを用いたパターン形成方法について、図面を参照しながら説明する。

第2の実施形態の変形例が第2の実施形態と異なっている点は次の通りである。すなわち、第2の実施形態においては、マスクエンハンサーよりなるマスクパターンを構成する遮光部は完全遮光部であることを暗黙のうちに想定してきたが、第2の実施形態の変形例においては、マスクパターンを構成する遮光部として、露光光に対して所定の透過率を有する半遮光部を用いる。尚、この半遮光部は、透光部との間で露光光に対して位相差を生じないことが理想的であるが、この位相差が $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）であれば無視できる程度であると考えられる。

第2の実施形態の変形例においては、イメージ強調法の原理は基本的に図3の場合と同様に考えることができるが、若干異なる効果が生じる。以下、マスクパターンを構成する遮光部として半遮光部を用いることにより生じる効果について図28及び図29を参照しながら説明する。ここで、図28は、マスクエンハンサーよりなるマスクパターンの線幅 L が十分に細い場合、つまり線幅 L が $0.8 \times \lambda / NA$ （ λ は露光光の波長、 NA は開口数）よりも小さい場合におけるイメ

ージ強調法の原理を示す模式図であり、図 2 9 は、マスクエンハンサーよりなるマスクパターンの線幅 L が十分に太い場合、つまり線幅 L が $0.8 \times \lambda / NA$ よりも大きい場合におけるイメージ強調法の原理を示す模式図である。

図 2 8 及び図 2 9 に示すように、イメージ強調マスクは、イメージ強調マスクのマスクパターンと対応する半遮光部が設けられた半遮光マスクと、マスク表面を覆う完全遮光部にイメージ強調マスクの位相シフターと対応する位相シフトパターンが設けられた位相シフト透過マスクとを重ねあわせた構造を有している。尚、図 2 8 及び図 2 9 においては、半遮光マスク、位相シフト透過マスク及びイメージ強調マスクのそれぞれを透過して線分 AA' と対応する位置に転写される光の振幅強度を合わせて示している。

まず、図 2 8 に示すように、マスクエンハンサーよりなるマスクパターンの線幅 L が $0.8 \times \lambda / NA$ よりも小さい場合において遮光部として半遮光部を用いた場合、イメージ強調法の原理は、遮光部として完全遮光部を用いた図 3 の場合とほぼ同じである。但し、半遮光マスクを透過した光の振幅強度に見られるように、半遮光部よりなる半遮光パターンの中心と対応する位置に転写される強度は、半遮光パターン周辺からの光によるものだけではなく、半遮光パターン内部を透過した光によるものも存在する。このため、図 2 8 に示す半遮光パターンの中心と対応する位置に転写される光強度は、遮光部として完全遮光部を用いたときよりも、半遮光パターン内を透過する光の分だけ増加する。従って、該増加分を打ち消すためには、遮光部として完全遮光部を用いたときよりも、位相シフターの幅を大きくする必要がある。この点だけが、マスクパターンの線幅 L が $0.8 \times \lambda / NA$ よりも小さい場合における、遮光部として半遮光部を用いたときと、遮光部として完全遮光部を用いたときとの違いである。

ところで、完全遮光部よりなる完全遮光パターンは、その線幅が $0.8 \times \lambda / NA$ よりも大きくなると、パターン周辺からパターン裏側に回り込む光がほとんどなくなるので、完全遮光パターンの中心と対応する位置に転写される光の強度

がほぼ0になる。従って、このような完全遮光パターン内に位相シフターを配置した場合には、その位相シフターの幅がどれだけ小さくてもコントラストの低下がもたらされる。

それに対して、図29に示すように、マスクエンハンサーよりなるマスクパターンの線幅 L が $0.8 \times \lambda / NA$ よりも大きい場合において遮光部として半遮光部を用いた場合、線幅 L が $0.8 \times \lambda / NA$ よりもどれだけ大きくなろうと、イメージ強調マスクと対応する半遮光マスクの半遮光パターン内を透過する光が存在する。このため、半遮光パターンの中心と対応する位置に転写される光の強度は0にならない。従って、このときの半遮光パターン内を透過する光をちょうど打ち消す強度の光を透過させる寸法幅の位相シフターであれば、半遮光パターン内のどこに配置したとしてもコントラストを低下させることはない。また、マスクパターンの線幅 L が $0.8 \times \lambda / NA$ の2倍以上大きい場合、前述の寸法幅の位相シフターであれば $0.8 \times \lambda / NA$ 以上の距離離して配置するならば複数配置してもよいことになる。

次に、イメージ強調マスクにおいてマスクパターンを構成する遮光部として完全遮光部に代えて半遮光部を用いることによりマスク作成の上で生じる利点について説明する。

図30(a)は、完全遮光部よりなる線幅 L の完全遮光パターンが設けられたフォトマスクの平面図と、該マスクを透過して線分 AA' と対応する位置に転写される光の光強度とを示しており、図30(b)は、半遮光部よりなる線幅 L の半遮光パターンが設けられたフォトマスクの平面図と、該マスクを透過して線分 AA' と対応する位置に転写される光の光強度とを示している。

完全遮光パターンの線幅 L が $0.8 \times \lambda / NA$ よりも大きくなった場合、図30(a)に示すように、完全遮光パターンの中心と対応する位置に転写される光の強度は0となる。すなわち、イメージ強調マスクにおいてマスクパターンを構成する遮光部として完全遮光部を用いる場合には、図30(c)に示すように、

完全遮光パターンの幅 L が大きくなるに従って位相シフターの幅は小さくなり、線幅 L が $0.8 \times \lambda / NA$ よりも大きくなった場合には位相シフターを消滅させる必要がある。しかしながら、実際にマスク作成を行なう際には、位相シフターの線幅の変化は、マスクグリッド（マスク寸法の調整が可能な最小幅：通常は 1 nm 程度）の単位で変化させることになると共に、マスク加工上の制限から、作成可能な位相シフターの線幅の最小値にも制限が課せられる。このため、イメージ強調マスクにおいてマスクパターンを構成する遮光部として完全遮光部を用いていたのでは、遮光パターン内に常に最適な位相シフターを配置することは不可能である。

それに対して、図 30 (b) に示すように、半遮光パターンは $0.8 \times \lambda / NA$ よりも大きい線幅を有している場合でも、半遮光パターンの中心と対応する光強度が 0 にはならず、半遮光パターン内を透過する光による残留光強度が存在する。すなわち、この残留光強度と釣り合う線幅の位相シフターであれば、どんな線幅の半遮光パターン内でも配置可能である。具体的には、図 30 (d) に示すように、半遮光パターンの線幅 L が大きくなるに従って位相シフターの線幅は小さくなるが、位相シフターの線幅が前述の残留光強度と釣り合う寸法まで小さくなったら、位相シフターの線幅をそれ以上小さくする必要はない。このように、イメージ強調マスクにおいてマスクパターンを構成する遮光部として半遮光部を用いる場合には、所定の線幅の位相シフターを半遮光パターン内の任意の位置に配置できる。よって、半遮光部の透過率を、該半遮光部の残留光強度が実際のマスク上で作成可能な位相シフターの最小幅と対応するように調整すれば、任意の半遮光パターンにおいて最適な位相シフターを配置できるようになる。また、このときの半遮光部の透過率がレジストを感光させない程度に低いものであれば、線幅が $0.8 \times \lambda / NA$ 以上の半遮光パターンにおいては、位相シフターを配置するか又は消去するかも任意に決めることができる。さらに、半遮光パターン内で位相シフター同士の距離が $0.8 \times \lambda / NA$ 以上になれば半遮光パターン内に

複数の位相シフターを配置できる。この場合、位相シフターを半遮光パターンの中心部ではなく半遮光パターンの周縁部に配置すれば、半遮光パターンの周縁部のコントラスト強調をも実現できる。

以上に説明したように、第2の実施形態の変形例によると、マスクエンハンサーよりなるマスクパターンを構成する遮光部として完全遮光部に代えて半遮光部を用いることにより、マスクパターンによる光強度のコントラストを強調する位相シフターの配置を任意のパターン形状について正確に実現できる。また、マスクパターンを構成する半遮光部を透過する光のために、マスクパターン内の任意の位置に位相シフターを配置することが可能となるので、位相シフターを配置することによってコントラストを強調する場所をマスクパターン内において任意に設定することが可能になるという特有の効果も得られる。

尚、第2の実施形態の変形例において、マスクエンハンサーよりなるマスクパターンを構成する遮光部として用いる半遮光部の透過率は15%程度以下であることが好ましい。その理由は、次の通りである。すなわち、光強度 I_{th} をレジスト膜が感光する臨界強度とし、光強度 I_b を半遮光部を透過する光のバックグラウンド強度とすると、 I_{th}/I_b が高い程パターン形成時にレジスト膜の膜減り等が発生しないことを意味し、この値が高いほど好ましい。一般に、 I_{th}/I_b の値は2以上あることが望まれている。ところが、 I_{th}/I_b は半遮光部の透過率が高くなるほど低くなるので、 I_{th}/I_b の向上には半遮光部の透過率が高くなりすぎると好ましくない。具体的には、半遮光部の透過率が15%程度で I_{th}/I_b は2よりも小さくなってしまうので、半遮光部の透過率は15%程度以下であることが好ましい。

第3の実施形態

以下、本発明の第3の実施形態に係るパターン形成方法について、マスクエンハンサーよりなるマスクパターンを有するフォトマスク（第2の実施形態に係る

フォトマスクの一例)を用いた露光によってフォーカスマージンを向上させる方法を例として、図面を参照しながら説明する。尚、第3の実施形態におけるフォーカスマージン向上効果は、マスクパターン回折光をシフター透過光によって相殺する本発明のイメージ強調法と露光方法との組み合わせによって実現されるものであり、第2の実施形態に係るフォトマスクにおいてマスクエンハンサーの開口部幅を増減させることと、第1の実施形態に係るフォトマスクにおいて位相シフターの透過率を増減させることとは同等な効果をもたらすものと考えることができる。すなわち、第3の実施形態に係るパターン形成方法は、第1又は第2の実施形態に係るフォトマスクのいずれかを用いることにより実現できるパターン形成方法である。

図31(a)～(g)は、マスクエンハンサーを用いた露光によって被露光材料上に生じる光強度分布の、光源からフォトマスクまでの露光光の入射方向(以下、単に露光光入射方向と称する)に対する依存性を説明するための図である。具体的には、マスクパターン回折光をシフター透過光によって相殺することにより形成される光強度分布のプロファイル形状が、露光光入射方向によってどのような影響を受けるかを評価するために行なったシミュレーション結果を示している。より詳しくは、図31(a)に示すような、光源座標のY軸に沿って平行に設けられたライン状のマスクエンハンサー(マスクパターン幅L、開口部幅S)を用いた露光によって被露光材料上に転写される光強度分布を、色々な露光光入射方向に対してシミュレーションにより計算して評価している。

図31(b)～(d)はシミュレーションに用いた小さな光源の光源座標上における配置位置を示しており、(b)は露光光入射方向が光源座標の中心方向からの入射(垂直入射)になる光源であり、(c)は露光光入射方向が光源座標のX軸方向又はY軸方向からの斜入射になる光源であり、(d)は露光光入射方向が光源座標の45度方向($Y = X$ 又は $Y = -X$ の直線方向)からの斜入射になる光源である。ここで、シミュレーションで用いた、図31(b)～(d)に示す

光源は、光源座標上で半径 0.05 を有する円光源である。但し、光源座標上の数値は全て露光機の縮小投影光学系の開口数 NA により規格化している。

図 3 1 (e) ~ (g) は、マスクパターンの構造を色々変えた露光によって被露光材料上における図 3 1 (a) の X 軸と対応する位置に生じる光強度分布を示している。図 3 1 (e) ~ (g) において、横軸（位置）の 0 はマスクパターン中心と対応する位置である。

ここで、図 3 1 (e) は幅 $L = 0.12 \mu\text{m}$ のマスクパターンの全体が遮光膜よりなる場合 ($S = 0.0 \mu\text{m}$) における光強度分布を各露光光入射方向について示している。但し、露光光入射方向以外の光学条件は、露光光の波長 $\lambda = 193 \text{ nm}$ 、開口数 $NA = 0.6$ で全て共通である。

図 3 1 (e) に示すように、露光光入射方向によってマスクパターンの実効的な遮光性が異なっており、45 度方向からの斜入射の場合の遮光性が最も悪くなっている。

また、図 3 1 (f) は、各露光光入射方向について図 3 1 (e) に示す光強度分布上の位置 0 の光強度が一致するようにマスクパターン幅 L を調整した場合における光強度分布を示している。

また、図 3 1 (g) は、各露光光入射方向について図 3 1 (f) に示すように幅 L が調整されたマスクパターンの実効的な遮光性が最大となるように位相シフターとなる開口部（幅 S ）を本発明のイメージ強調法により設けた場合における光強度分布を示している。ここでは、シフター透過光がマスクパターン回折光を打ち消すことにより光強度分布のプロファイル形状にどのような影響が生じるかを観察するために、図 3 1 (b) ~ (d) に示す各光源の配置位置におけるシフター透過光及びマスクパターン回折光のそれぞれの光強度を同一にして評価を行っている。また、図 3 1 (f) 及び図 3 1 (g) のそれぞれに示す光強度分布のプロファイル形状を比較しやすいように、図 3 1 (g) の縦軸（光強度）の目盛りを 0.1 だけオフセットしている。

図31(f)及び図31(g)のそれぞれに示す光強度分布のプロファイル形状を、露光光入射方向が光源座標の中心方向からである場合について比較すると、シフター透過光によってマスクパターン回折光を打ち消すことにより、光強度分布のプロファイル形状がマスクパターン中心と対応する位置で平坦になっていることがわかる。これは、マスクパターンの遮光性が向上している一方、光強度分布のプロファイル形状が鈍くなっている（悪化している）ことを意味する。

また、図31(f)及び図31(g)のそれぞれに示す光強度分布のプロファイル形状を、露光光入射方向が光源座標のX軸方向又はY軸方向からの斜入射である場合について比較すると、シフター透過光によってマスクパターン回折光を打ち消しても、光強度分布のプロファイル形状がほとんど変化していないことがわかる。

一方、図31(f)及び図31(g)のそれぞれに示す光強度分布のプロファイル形状を、露光光入射方向が光源座標の45度方向からの斜入射である場合について比較すると、シフター透過光によってマスクパターン回折光を打ち消すことにより、光強度分布のプロファイル形状がマスクパターン中心と対応する位置で鋭くなっている（良くなっている）ことがわかる。

すなわち、シフター透過光によってマスクパターン回折光を打ち消すという本発明のイメージ強調法を用いることにより、どんな露光光入射方向に対してもマスクパターン中心と対応する位置での遮光性を最大にすることができるが、光強度分布のプロファイル形状に与える影響は露光光入射方向によって異なる。

以下、前述の、本発明のイメージ強調法において露光光入射方向として45度方向からの斜入射を用いときに光強度分布のプロファイル形状が劣化しないことを利用して、マスクエンハンサーを用いた露光によるパターン形成におけるデフォーカス特性を向上させる方法について説明する。

図32(a)～(d)及び図33(a)～(d)は、マスクエンハンサーを利用したデフォーカス特性向上方法の原理を示す図である。尚、図32(a)～(

d) 及び図 3 3 (a) ~ (d) に示す光強度の計算結果は全て、図 3 1 (d) に示す、光源座標の 45 度方向からの斜入射露光を用いたシミュレーション結果である。

図 3 2 (a) は、幅 L の遮光膜及び幅 S の開口部がそれぞれ単独で設けられたフォトリソマスクを用いた露光において被露光材料上に投影される光強度分布を示している。尚、図 3 2 (a) においては、 $L = 0.15 \mu\text{m}$ の場合の結果と、 $S = 0.045 \mu\text{m}$ 、 $0.060 \mu\text{m}$ 、 $0.075 \mu\text{m}$ 、 $0.090 \mu\text{m}$ と変化させた場合の結果とを示している。また、図 3 2 (a) において、横軸（位置）の 0 は、被露光材料上における遮光膜中心又は開口部中心と対応する位置である。

図 3 2 (b) は、図 3 2 (a) に示す光強度分布における遮光膜中心又は開口部中心と対応する位置の光強度が露光におけるデフォーカスに対して変化する様子を示している。

図 3 2 (b) に示すように、遮光膜によって生じる光強度はデフォーカスが大きくなるに従って増加する一方、開口部によって生じる光強度はデフォーカスが大きくなるに従って減少する。

ところで、遮光膜に位相シフターとなる開口部を設けてマスクエンハンサー構造を作成することにより、マスクパターン回折光とシフター透過光とを互いに反対位相の光として干渉させた場合、マスクエンハンサーによって実現される光強度は、マスクパターン回折光の光強度とシフター透過光の光強度との差分に比例したものとなる。このとき、もし、ベストフォーカス（デフォーカスが 0）においてシフター透過光の光強度がマスクパターン回折光の光強度よりも大きく設定されていた場合、各光強度の差はデフォーカスが大きくなるに従って減少して、あるデフォーカス量で該光強度差が 0 となり、その後、マスクパターン回折光の光強度がシフター透過光の光強度よりも大きくなると共に各光強度の差はデフォーカスが大きくなるに従って増加する。

第 3 の実施形態においては、この効果を利用してデフォーカス特性の向上が可

能となる。例えば、開口部幅 S ($S = 0.045 \mu\text{m}$ 、 $0.060 \mu\text{m}$ 、 $0.075 \mu\text{m}$ 、 $0.090 \mu\text{m}$) のマスクエンハンサーよりなるパターン幅 L ($L = 0.15 \mu\text{m}$) のマスクパターンが設けられたフォトマスクを用いた露光において被露光材料上におけるマスクパターン中心と対応する位置での光強度は、図 3 2 (b) に示す、遮光膜によって生じる光強度と、開口部によって生じる光強度とを位相空間上で足し合わせることによって得られる。このとき、まず、各光強度の平方根をとることによって、遮光膜及び開口部のそれぞれによって生じる位相空間上での光強度を求めることができる。また、位相シフターとなる開口部によって生じる位相空間上での光強度は位相を考慮して負の値とする。

図 3 2 (c) は、前述のようにして求められた、遮光膜及び開口部のそれぞれによって生じる位相空間上での光強度が露光におけるデフォーカスに対して変化する様子を示している。

また、図 3 2 (d) は、図 3 2 (c) に示す遮光膜及び開口部のそれぞれによって生じる位相空間上での光強度の合計値が露光におけるデフォーカスに対して変化する様子を示している。すなわち、図 3 2 (d) に示す結果は、開口部幅 S ($S = 0.045 \mu\text{m}$ 、 $0.060 \mu\text{m}$ 、 $0.075 \mu\text{m}$ 、 $0.090 \mu\text{m}$) のマスクエンハンサーよりなるパターン幅 L ($L = 0.15 \mu\text{m}$) のマスクパターンが設けられたフォトマスクを用いた露光において被露光材料上におけるマスクパターン中心と対応する位置での光強度（位相空間上）のデフォーカス特性を表している。

図 3 2 (d) に示すように、開口部幅 $S = 0.06 \mu\text{m}$ の場合、ベストフォーカスにおいてマスクパターン回折光とシフター透過光とが互いに完全に打ち消し合うので、マスクパターン中心と対応する位置での光強度（位相空間上）がほぼ 0 になっている。一方、開口部幅 S が $0.06 \mu\text{m}$ 以上になると、ベストフォーカスにおいてシフター透過光が過剰となってマスクパターン中心と対応する位置での光強度（位相空間上）が負の値を有するようになる。しかし、ベストフォー

カスにおいてシフター透過光が過剰となる場合でも、デフォーカスが大きくなるに従って、マスクパターン回折光が過剰な状態へと変化する。

図33(a)は、図32(d)に示す位相空間上での光強度を2乗することにより得られた実空間上の光強度（エネルギー強度と対応する）が露光におけるデフォーカスに対して変化する様子を示している。すなわち、図33(a)に示す結果は、開口部幅 S （ $S = 0.045\mu\text{m}$ 、 $0.060\mu\text{m}$ 、 $0.075\mu\text{m}$ 、 $0.090\mu\text{m}$ ）のマスクエンハンサーよりなるパターン幅 L （ $L = 0.15\mu\text{m}$ ）のマスクパターンが設けられたフォトマスクを用いた露光において被露光材料上におけるマスクパターン中心と対応する位置での光強度（実空間上）のデフォーカス特性を表している。

図33(a)に示すように、ベストフォーカスにおいてシフター透過光が過剰となるマスクエンハンサーの場合、デフォーカス状態において実効的な遮光性が最大となる。このとき、ベストフォーカスでの実効的な遮光性が最大ではなくても実用上問題ない範囲にあれば、遮光性が最大になるフォーカス位置がデフォーカス位置に移動した分だけ、デフォーカスに起因する遮光性の劣化が起きにくくなる。すなわち、これが第3の実施形態におけるマスクエンハンサーを利用したデフォーカス特性向上方法の原理である。

図33(b)は、前述の各開口部幅 S を有するマスクエンハンサーをベストフォーカスで用いた場合における被露光材料上に投影される光強度分布を示している。図33(b)に示すように、シフター透過光が最適であっても過剰であっても、各開口部幅 S において、ほぼ同等のコントラストを有する光強度分布が実現されている。すなわち、全ての開口部幅 S について、マスクパターンの十分な遮光性が実現されている。

図33(c)は、開口部幅 S が $0.09\mu\text{m}$ のマスクエンハンサーを色々なデフォーカス位置で用いた場合における被露光材料上に投影される光強度分布を示している。図33(c)に示すように、このマスクエンハンサーによると、マス

クパターン領域外と対応する位置での光強度分布はデフォーカスによって変化しているにもかかわらず、マスクパターン領域内と対応する位置での光強度分布はデフォーカスによってほとんど変化していない。参考までに、マスクエンハンサーに代えて完全遮光膜をマスクパターンとして色々なデフォーカス位置で用いた場合における被露光材料上に投影される光強度分布を図33(d)示す。

以上に説明したように、第3の実施形態によると、マスクエンハンサーによってマスクパターン回折光に対してシフター透過光を制御できる作用を利用して、シフター透過光をマスクパターン回折光に対して過剰に設定することにより、光強度分布におけるデフォーカス特性を向上できるので、パターン形成におけるフォーカスマージンを飛躍的に向上させることができる。

尚、第3の実施形態において、シフター透過光をマスクパターン回折光に対して過剰に設定する場合に、完全遮光膜よりなるマスクパターンよりも遮光性を劣化させないという条件を設けるなら、シフター透過光のマスクパターン中心と対応する位置での光強度を、マスクパターン回折光のマスクパターン中心と対応する位置での光強度の4倍以上にすることはできない。すなわち、マスクエンハンサーの開口部幅に対して（シフター透過光の制御のために位相シフターの透過率を調整する場合には該透過率に対して）、この条件より上限を定めることになる。

ここまで、図32(a)～(d)及び図33(a)～(d)を用いて、マスクエンハンサーを利用したデフォーカス特性向上方法の原理について説明してきたが、前述のようにマスクパターン回折光とシフター透過光とを合成して光強度分布を形成する場合には、そのプロファイル形状が露光光入射方向によって大きな影響を受ける（図31(g)参照）。そこで、以下、マスクエンハンサーを利用したデフォーカス特性向上方法が、露光光入射方向によってどのような影響を受けるのかについて説明する。

図34(a)～(c)、図35(a)～(c)及び図36(a)～(c)は、デフォーカスによる光強度分布のプロファイル形状変化の露光光入射方向に対す

る依存性を説明するための図である。具体的には、図 3 1 (b) ~ (d) に示す各露光光入射方向を用いて、図 3 1 (g) に示すように各露光光入射方向に対する遮光性が最大になるように調整されたマスクエンハンサーのデフォーカス特性をシミュレーションにより求めた結果を示している。ここで、図 3 4 (a) ~ (c) に示す結果は露光光入射方向を光源座標の中心方向からの入射とした場合に得られた結果であり、図 3 5 (a) ~ (c) に示す結果は露光光入射方向を光源座標の X 軸方向又は Y 軸方向からの斜入射とした場合に得られた結果であり、図 3 6 (a) ~ (c) に示す結果は露光光入射方向を光源座標の 45 度方向からの斜入射とした場合に得られた結果である。また、図 3 4 (a)、図 3 5 (a)、図 3 6 (a) に示す結果は、マスクエンハンサーに代えて同一外形寸法の遮光膜をマスクパターンとして用いたときの光強度分布（つまりマスクパターン回折光による光強度分布）のデフォーカス特性を示しており、図 3 4 (b)、図 3 5 (b)、図 3 6 (c) に示す結果は、マスクエンハンサーの開口部と同一寸法の開口部が遮光膜に設けられているときの光強度分布（つまりシフター透過光による光強度分布）のデフォーカス特性を示しており、図 3 4 (c)、図 3 5 (c)、図 3 6 (c) に示す結果は、マスクエンハンサーを用いたときの光強度分布（つまりマスクパターン回折光とシフター透過光との合成光による光強度分布）のデフォーカス特性を示している。ここで、図 3 4 (c)、図 3 5 (c)、図 3 6 (c) に示す結果を、他の図に示す結果と比較しやすいように、図 3 4 (c)、図 3 5 (c)、図 3 6 (c) の縦軸（光強度）の目盛りを 0.1 だけオフセットしている。

図 3 4 (b)、図 3 5 (b)、図 3 6 (b) に示すように、シフター透過光による光強度分布のデフォーカス特性は露光光入射方向に対して依存性を有しているが、各露光光入射方向と対応するデフォーカス特性の差はさほど大きくない。しかし、図 3 4 (a)、図 3 5 (a)、図 3 6 (a) に示すように、マスクパターン回折光による光強度分布のデフォーカス特性は露光光入射方向によって著し

く異なる。特に、露光光入射方向が光源座標の中心方向である場合には、マスクパターン中心付近と対応する位置での光強度がデフォーカスによって局所的に増加するようなプロファイルとなる。そのため、露光光入射方向が光源座標の中心方向からの入射である場合にマスクパターン回折光にシフター透過光を付け加えると、このプロファイルが一層悪化することになる。実際に、図34(a)に示す光強度分布のプロファイル形状のデフォーカス特性と、図34(c)に示す光強度分布のプロファイル形状のデフォーカス特性とを比較すると、マスクエンハンサーによる光強度分布のプロファイル形状がデフォーカスによって大きく劣化していることがわかる。一方、露光光入射方向が光源座標のX軸方向又はY軸方向からの斜入射である場合には、図35(a)～(c)に示すように、マスクパターン回折光にシフター透過光を付け加えても、光強度分布のプロファイル形状は劣化もしないが向上もしない。また、露光光入射方向が光源座標の45度方向からの斜入射である場合には、図36(a)～(c)に示すように、マスクパターン回折光にシフター透過光を付け加えることによって、光強度分布のプロファイル形状が向上していることがわかる。

前述の結果を明確にするために、本願発明者は、マスクエンハンサーにおける位相シフターとなる開口部の寸法が異なるフォトマスクを用いて、各露光光入射方向からの露光を行なった場合のDOF（フォーカス深度）特性をシミュレーションによって計算してみた。図37(a)～(c)はその結果を示しており、図37(a)は露光光入射方向が光源座標の中心方向からの入射である場合の結果を示し、図37(b)は露光光入射方向が光源座標のX軸方向又はY軸方向からの斜入射である場合の結果を示し、図37(c)は露光光の入射方向が光源座標の45度方向からの斜入射である場合の結果を示す。ここで、マスクエンハンサーとして、各露光光入射方向に対して遮光性が最大になるように調整された開口部幅（以下、最適開口部幅と称する）を有するマスクエンハンサーと、最適開口部幅よりも小さい開口部幅を有するマスクエンハンサーと、最適開口部幅よりも

大きい開口部幅を有するマスクエンハンサーとを用いた。また、比較のために、マスクエンハンサーに代えて同一の外形形状を有する完全遮光膜をマスクパターンとして用いた場合におけるDOF特性についてもシミュレーションによって計算してみた。尚、DOF特性は、各マスクパターンに対してベストフォーカス時に形成されるパターン（レジストパターン）の寸法が $0.12\mu\text{m}$ となる露光エネルギーを設定したときにデフォーカスによってパターン寸法がどのように変化するかを基準にして評価している。また、図37(a)～(c)において、Lはマスクパターン幅、Sは開口部幅を示しており、フォーカス位置（横軸）0がベストフォーカス位置と対応している。

図37(a)に示すように、露光光入射方向が光源座標の中心方向からの入射である場合、マスクエンハンサーの開口部幅を大きくするに従ってDOF特性は劣化しており、完全遮光膜をマスクパターンとして用いたとき（ $L/S = 0.12/0\mu\text{m}$ ）のDOF特性が最も優れている。

一方、図37(b)に示すように、露光光入射方向が光源座標のX軸方向又はY軸方向からの斜入射である場合、DOF特性はマスクエンハンサーの開口部幅に依存しておらず、マスクエンハンサーを用いた場合も完全遮光膜を用いた場合（ $L/S = 0.13/0\mu\text{m}$ ）も同じDOF特性である。

しかし、図37(c)に示すように、露光光入射方向が光源座標の45度方向からの斜入射である場合、マスクエンハンサーの開口部幅を大きくするに従ってDOF特性が向上しており、完全遮光膜をマスクパターンとして用いたとき（ $L/S = 0.15/0\mu\text{m}$ ）のDOF特性が最低である。

すなわち、45度方向からの斜入射露光においてマスクパターン回折光とシフター透過光との干渉により生じる光強度分布のデフォーカス特性を向上させるためには、必要最低限の実効的な遮光性を実現できる範囲でシフター透過光を可能な限り増大させればよいことが分かる。

ここまで、45度方向からの斜入射露光を用いた、マスクエンハンサーによる

デフォーカス特性向上方法について説明してきたが、次に、実際にデフォーカス特性の向上効果が実現される光源位置の設定方法について説明する。

図38(a)～(c)は、完全遮光膜よりなるマスクパターンを用いた露光における、色々な光源位置と対応するDOFマップを示す図である。具体的には、DOFマップ評価用のマスクパターンとしては、図38(a)に示すような、光源座標上のY軸と平行なライン状のマスクパターンを想定した。また、光源座標上のX軸と平行なライン状のマスクパターンと対応するDOFマップが、図38(a)に示すマスクパターンと同様の特性を生じるように、光源位置つまり露光光入射方向としては、図38(b)に示すような、光源座標上のX軸及びY軸に対して対称であり且つ4回転対称である光源位置を想定した。このとき、光源位置がX軸、Y軸又は対角線($Y = X$ 又は $Y = -X$)上である場合を除いて、必ず8点の光源位置が同時に存在することになる。ここで、光源座標上の数値は全て露光機の縮小投影光学系の開口数NAにより規格化している。

図38(c)は、図38(b)に示す座標(x, y)の光源位置から半径0.05の円光源を用いて露光を行なった場合における、完全遮光膜よりなるマスクパターン(幅 $L = 0.15 \mu\text{m}$ 、開口部幅 $S = 0 \mu\text{m}$ 、図38(a)参照)のDOFを各光源位置に対してマッピングした結果を示している。ここでは、ベストフォーカス時に形成されるラインパターン(レジストパターン)の寸法が $0.12 \mu\text{m}$ となるような露光強度で露光を行なっており、該露光時にフォーカス変動に対してパターン寸法が $0.12 \pm 0.012 \mu\text{m}$ の寸法に収まる最大フォーカス幅を用いてDOFを定義している。また、露光光源としてArF光源を用いると共に、露光機の縮小投影光学系の開口数として0.6を用いている。

図38(c)に示すように、様々な光源位置と対応するDOFの平均値は $0.3 \mu\text{m}$ 程度であり、原点($X = 0, Y = 0$)からの距離が1である光源位置を用いてパターン露光したときのDOFが $0.3 \mu\text{m}$ 程度である。また、DOFが平均よりも高くなる光源位置は座標($X = 0.5, Y = 0.5$)を中心とする位置

と、該位置を原点中心に90度、180度、270度ずつ回転させた位置とに局在しており、これら4つの光源位置からの斜入射露光を用いることによって、より優れたDOFを得ることができる。しかし、図38(c)から分かるように、完全遮光膜よりなるマスクパターンの場合、例えば前述の光源位置を用いてDOFが改善されたとしても、その程度はDOFの平均値の2倍程度にすぎない。

図39(a)～(d)及び図40(a)～(d)は、マスクエンハンサーよりなるマスクパターンを用いた露光における、色々な光源位置と対応するDOFマップを示す図である。具体的には、DOFマップ評価用のマスクパターンとしては、図39(a)に示すような、マスクパターン幅が L ($0.15\mu\text{m}$)であり、位相シフターとなる開口部の幅が S ($0.04\mu\text{m}$ 、 $0.08\mu\text{m}$ 又は $0.10\mu\text{m}$)であるマスクエンハンサーを想定した。ここで、前述のように、DOFマップは光源座標上の原点に対して4回転対称となるので、以下の説明においてはDOFマップのうち光源座標上の第1象限 ($X \geq 0$ 且つ $Y \geq 0$ の領域) と対応する部分だけを示す。

図39(b)～(d)は、図39(a)に示すマスクエンハンサーよりなるマスクパターンのDOFを各光源位置に対してマッピングした結果を示しており、図39(b)は開口部幅 S を $0.04\mu\text{m}$ としたときに得られる結果であり、図39(c)は開口部幅 S を $0.08\mu\text{m}$ としたときに得られる結果であり、図39(d)は開口部幅 S を $0.10\mu\text{m}$ としたときに得られる結果である。ここで、露光光源としてArF光源を用いると共に、露光機の縮小投影光学系の開口数として0.6を用いている。図39(b)～(d)に示すように、マスクエンハンサーの開口部幅 S が大きくなるに従って、光源位置が座標 ($X = 0.5$ 、 $Y = 0.5$) の付近に存在するときの斜入射露光によって、DOFが著しく増大していることが分かる。

図40(a)は、図38(c)及び図39(b)～(d)のそれぞれに示すDOFマップにおける $X = Y$ 線(対角線)上の光源位置と対応するDOF値をプロ

ットした結果を示している。図40(a)に示すように、45度方向からの斜入射露光においては、光源座標上の原点からの距離が0.4以上で且つ0.85以下である光源位置の斜入射露光を行なうことによって、マスクエンハンサーの開口部幅Sが大きくなるに従ってDOFを飛躍的に向上させることができる。一方、45度方向からの斜入射露光においては、光源座標上の原点からの距離が0.4以下である光源位置の斜入射露光を行なうと、マスクエンハンサーの開口部幅Sが大きくなるに従ってDOFが低下してしまう。

図40(b)～(d)は、図39(b)～(d)のそれぞれに示すDOFマップ(マスクエンハンサーよりなるマスクパターン)における、図38(c)に示すDOFマップ(完全遮光膜よりなるマスクパターン)と比べて0.05 μm 以上DOFが増加又は減少している領域を示している。図40(b)～(d)に示す結果から、座標($X=0.5$ 、 $Y=0.5$)付近に光源位置が存在し、且つ光源座標上の原点からの距離が所定値(0.4程度)以下の領域における光源が取り除かれた露光が行なえるように露光機の縮小投影光学系の光学設定を行なうことによって、DOFを確実に向上させることができることがわかる。これが汎用的な傾向であるのか否かを確認するために、本願発明者は、完全遮光膜よりなるマスクパターン($L/S=0.15/0\mu\text{m}$)のDOFマップ、及びマスクエンハンサーよりなるマスクパターン($L/S=0.15/0.02$ 、 0.04 、 $0.06\mu\text{m}$)のDOFマップを、露光機の縮小投影光学系の開口数を0.6としてKrF光源及びF₂光源を用いた場合、並びに露光機の縮小投影光学系の開口数を0.7及び0.8としてArF光源を用いた場合のそれぞれについて求めて、各DOFマップに基づいて、図40(a)に示すような、対角線上の光源位置と対応するDOF値を求めてみた。図41(a)～(d)はその結果を示しており、図41(a)は露光機の縮小投影光学系の開口数を0.6としてKrF光源を用いた場合における対角線上の光源位置と対応するDOF値を示し、図41(b)は露光機の縮小投影光学系の開口数を0.6としてF₂光源を用いた場合に

における対角線上の光源位置と対応するDOF値を示し、図41(c)は露光機の縮小投影光学系の開口数を0.7としてArF光源を用いた場合における対角線上の光源位置と対応するDOF値を示し、図41(d)は露光機の縮小投影光学系の開口数を0.8としてArF光源を用いた場合における対角線上の光源位置と対応するDOF値を示す。図41(a)～(d)に示す結果から、座標($X=0.5$ 、 $Y=0.5$)付近に光源位置が存在する斜入射露光によってDOFが向上する傾向は汎用的な傾向であることがわかる。

一般に、 λ/NA 程度以下の周期で配置されるパターンの形成に斜入射露光を用いた場合、DOF特性が改善されることが知られている。しかし、孤立パターンの形成に斜入射露光を用いた場合、DOF特性がほとんど改善されないと共に光強度分布のコントラストが低下するので、孤立パターンの形成に斜入射露光を用いることは好ましくないとされている。それに対して、第3の実施形態においては、孤立パターンを形成する場合にも、マスクエンハンサーのDOF向上効果及びコントラスト向上効果によって、斜入射露光が最適な露光方法となる。従って、第3の実施形態によると、孤立パターンの形成においても小さい周期で配置されるパターンの形成においても最適な露光方法が一致するので、任意のレイアウトを有する微細なパターンを高精度で形成することができる。

第4の実施形態

以下、本発明の第4の実施形態に係るマスクパターン設計方法、具体的には、第1又は第2の実施形態に係るフォトマスク、つまりマスクパターン回折光をそれと反対位相を有するシフター透過光によって打ち消すことにより露光時における光強度分布のコントラスト及びフォーカスマージンを向上させるフォトマスクを作成するためのマスクパターン設計方法について、図面を参照しながら説明する。

図42は第4の実施形態に係るマスクパターン設計方法の各工程を示すフロー

チャートである。

まず、ステップ S 1 において、所望のパターン（レジストパターン）を形成するためのマスクパターンのレイアウト（以下、パターンレイアウトと称する）を作成すると共に、マスクパターンに配置される位相シフターの透過率 T を設定する。図 4 3（a）は、ステップ S 1 で作成されたパターンレイアウトの一例を示している。

次に、ステップ S 2 において、ステップ S 1 で作成されたパターンレイアウトを分割して、分割された各パターン（以下、分割パターンと称する）の中心付近に評価点 r を設定する。図 4 3（b）は、ステップ S 2 で各分割パターンに評価点 r を設定した様子を示している。

次に、ステップ S 3 において、パターンレイアウト全体に遮光膜よりなる遮光パターンが配置されているとするマスクデータを作成する。これは、マスクパターン回折光の光強度を算出するための評価用マスクと対応する。図 4 3（c）はステップ S 3 で作成されたマスクデータと対応する評価用マスクの一例を示している。この評価用マスクを用いた露光において被露光材料上における各評価点 r と対応する位置に投影転写される光強度 $I_c(r)$ を、実使用時の露光機の光学条件を用いた光強度シミュレーション等により算出する。

次に、ステップ S 4 において、ステップ S 3 で算出した $I_c(r)$ が所定値 I_t よりも大きくなる評価点 r を含有する分割パターン、つまり評価点 r における遮光性が十分ではない分割パターンを抽出する。図 4 3（d）はステップ S 4 で抽出された、評価点 r における遮光性が十分ではない分割パターンを示している。ステップ S 4 で抽出された分割パターンは、そこに遮光膜を配置しても、該遮光膜の周辺を透過して該遮光膜の裏側に回り込む光が多いために十分な遮光性が得られない部分である。

次に、ステップ S 5 において、ステップ S 4 で抽出された分割パターンに開口部が配置され、且つフォトマスクにおけるその他の部分に遮光部が配置されてい

るとするマスクデータを作成する。これは、シフター透過光の光強度の最大値を算出するための評価用マスクと対応する。図43(e)はステップS5で作成されたマスクデータと対応する評価用マスクの一例を示している。この評価用マスクを用いた露光において被露光材料上における各評価点 r と対応する位置に投影転写される光強度 $I_o(r)$ を、実使用時の露光機の光学条件を用いた光強度シミュレーション等により算出する。これにより、ステップS4で抽出された分割パターンに位相シフターが配置された場合におけるシフター透過光の光強度の最大値を $T \times I_o(r)$ と見積もることができるので、マスクパターン回折光の光強度（光強度 $I_c(r)$ ）を打ち消せるかどうかを判断することができる。

次に、ステップS6において、各評価点 r における光強度 $I_o(r)$ の値と光強度 $I_c(r)$ の値とを用いて、シフター透過光及びマスクパターン回折光のそれぞれの光強度を評価することにより、遮光性を向上させるための条件判断を行なう。

ところで、前述のように、マスクエンハンサーを用いた場合、透過率 T の位相シフターを部分的に遮光膜により覆い隠すことによって、0から T までの任意の透過率と対応する位相シフターを形成できる。しかし、実際のマスク加工を考慮すると、開口部寸法に下限が生じてくるので、開口部に最小寸法を設定しておく必要がある。従って、この最小寸法に基づいて、実質的に生成できる最小透過率 T_{min} を想定しておく。この場合、各分割パターンにおいて、

$$T_{min} \times I_o(r) \geq 4 \times I_c(r)$$

であれば開口部つまり位相シフターを設けない方が遮光性が高くなるので（第1又は第2の実施形態参照）、 $Z_4 = T_{min} / 4$ となる Z_4 に対して、 $I_c(r) / I_o(r)$ が Z_4 より小さくなる分割パターンには遮光部を配置する。

一方、位相シフターを覆い隠す遮光膜の幅は開口部を大きくするほど小さくなるので、遮光部としてフォトマスク上に形成可能な寸法にも限界が生じる。すなわち、遮光膜中に設けられた位相シフターを透過する光には上限があるので、こ

の上限に基づいて、実質的に生成できる最大透過率 T_{max} ($T_{max} < T$) を想定しておく。この場合、各分割パターンにおいて、

$$I_c(r) \geq T_{max} \times I_o(r)$$

であれば部分的に遮光膜により部分的に覆われた位相シフター（つまりマスクエンハンサー）を設ける代わりに、位相シフターのみを設けた方が遮光性が高くなるので、 $Z_1 = T_{max}$ となる Z_1 に対して、 $I_c(r) / I_o(r)$ が Z_1 より大きくなる分割パターンには位相シフターを配置する。

すなわち、各分割パターンにおいて、 $Z_4 > I_c(r) / I_o(r)$ であれば遮光部を設定し、 $Z_1 \geq I_c(r) / I_o(r) \geq Z_4$ であればマスクエンハンサーを設定し、 $I_c(r) / I_o(r) > Z_1$ であれば位相シフターを設定する。但し、簡単のため、 T_{min} 及び T_{max} を想定しない場合には、 $Z_1 = T$ 、 $Z_4 = T / 4$ である。図 43 (f) は、ステップ S4 で抽出された、遮光性が十分ではない分割パターンに対して、ステップ S6 で位相シフター又はマスクエンハンサーが設定された様子を示している。

次に、ステップ S7 において、ステップ S6 で分割パターンに設定されたマスクエンハンサーにおける位相シフターとなる開口部の大きさを決定する。このとき、マスクエンハンサーにより実効的に生成される透過率 T_e が遮光効果を最大にする条件は、 $T_e = I_c(r) / I_o(r)$ で表される。また、第 2 の実施形態で説明したように、開口部の等価透過率は開口面積率に比例した近似式で表される（図 26 (e) 参照）。従って、透過率 T の位相シフターを実質的に透過率 T_e の位相シフターと同等にするには、開口部の面積を $\alpha \times (T_e / T) + \beta$ で表される規則に基づき縮小してやればよい。ここで、 α 、 β 等の係数は、第 2 の実施形態で説明したように、露光光の波長等の露光機の光学パラメータやマスクパターン寸法に依存して決まる値である。具体的には、前述の規則に従って、マスクエンハンサーが設定された分割パターンが実効的に透過率 T_e の位相シフターとなるように、開口面積率が $\alpha \times (I_c(r) / (I_o(r) \times T)) + \beta$ と

なるような開口部を設定する。このとき、分割パターンの面積を S_c 、開口部の面積を S_o とすれば、

$$S_o = S_c \times (\alpha \times (I_c(r) / (I_o(r) \times T)) + \beta)$$

である。また、開口部の形状は、開口面積率が所定値であれば特に限定されるものではないが、簡単には、開口面積率に合わせてパターンレイアウト形状を単純に縮小した形状を開口部の形状として用いてもよい。図43(g)は、ステップS6で分割パターンに設定されたマスクエンハンサーに対して、ステップS7でパターンレイアウト形状が縮小された形状の開口部が設定された様子を示している。

次に、ステップS8において、ステップS7までに設定された位相シフター（マスクエンハンサーの開口部を含む）をパターンレイアウトから取り除いたパターンを遮光部パターンとして作成する。

最後に、ステップS9において、遮光部パターンと位相シフターパターンとからなるマスクパターンデータを作成する。図43(h)は、ステップS9で作成されたマスクパターンデータの一例を示している。その後、マスクパターンデータを出力してマスクパターン設計を終了する。これにより、所望のパターンレイアウトの全体に遮光パターンを配置したときに遮光効果が十分に得られない領域においてマスクパターン回折光の反対位相を有するシフター透過光を利用することによって、遮光効果を向上させることができるマスク構造を実現するためのマスクパターンデータの作成が可能となる。

以上に説明したように、第4の実施形態によると、マスクパターン回折光の光強度と、シフター透過光の光強度とをそれぞれ独立に計算して、各光強度の比率に基づいて、遮光性を最大にできる、位相シフトの透過率やマスクエンハンサーの開口部寸法を求めることができる。このため、マスクパターンの任意のレイアウトに対して、遮光性を最大にできる、位相シフトの透過率やマスクエンハンサーの開口部寸法を簡単に求めることができる。

尚、第4の実施形態において、ステップS7でマスクエンハンサーに設定される開口部の形状として、開口面積率に合わせてパターンレイアウト形状を単純に縮小した形状を用いたが、開口部の形状は、開口面積率が所定値であって、パターンレイアウトの内部に収まる形状であればどんな形状であってもよい。つまり、開口部形状は、開口面積率又は所定の範囲に設けられる開口部の面積が同じである限り、変形させても構わない。但し、通常は、実際のマスク加工において困難が生じない形状が望ましい。例えば、遮光膜の基板からの剥がれを引き起こすような、細長い遮光部パターンが形成されるようなは開口部形状は好ましくない。図44(a)は、図43(g)に示す開口部形状を、マスク上で遮光膜となるクロム膜が剥がれにくくなるように、つまり細長い遮光部パターンが生じないように変形させた結果を示している。また、図44(b)は、図44(a)と対応するマスクパターンデータを示している。

また、第4の実施形態において、パターンレイアウト（分割パターンを含む）に配置される遮光膜又は遮光部は、露光光に対して15%以下の透過率を持つと共に透光部との間で露光光に対して $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下（但しnは整数）の位相差を生じるものであってもよい。

第4の実施形態の第1変形例

以下、本発明の第4の実施形態の第1変形例に係るマスクパターン設計方法、具体的には、第1又は第2の実施形態に係るフォトマスクを作成するためのマスクパターン設計方法について、図面を参照しながら説明する。

図45及び図46は第4の実施形態の第1変形例に係るマスクパターン設計方法の各工程を示すフローチャートである。

第4の実施形態の第1変形例が第4の実施形態と異なっている点は、マスクエンハンサーの開口部面積の計算方法である。具体的には、第4の実施形態においては、マスクエンハンサーの開口部面積を開口面積率のみを用いた近似計算によ

り求めたが、第4の実施形態の第1変形例においては、マスクエンハンサーの開口部面積をさらに正確に求めていく。

尚、図45及び図46に示すように、第4の実施形態の第1変形例におけるステップS1～S6の各処理とステップS8及びS9の処理とは、図42に示す、第4の実施形態におけるステップS1～S6の各処理とステップS8及びS9の処理と全く同様である。すなわち、第4の実施形態の第1変形例においては、第4の実施形態におけるステップS7の処理が、ステップS10～S14の各処理、具体的には、マスクエンハンサーの開口部が十分な遮光効果を実現できるかどうかを確認検証し、その結果に基づき開口部面積を修正する手順と置き換えられている。これにより、マスクエンハンサーにより十分な遮光性を実現できるマスクパターンデータの作成が可能となる。

以下、ステップS10～S14までの処理について図45及び図46を参照しながら説明する。

ステップS10においては、位相シフターの透過率 T と、マスクエンハンサーにおいて最大遮光効果を実現する最適透過率 $T_e (= I_c(r) / I_o(r))$ との比のみを用いて開口面積率を設定し、該開口面積率に基づいてマスクエンハンサーの開口部の大きさを決定する。具体的には、分割パターンの面積を S_c 、開口部の面積を S_o とすれば、

$$S_o = S_c \times I_c(r) / (I_o(r) \times T)$$

である。以下、図43(g)がステップS10で設定された開口部を示しているものとして説明を行なう。

次に、ステップS11において、ステップS10までに位相シフター（マスクエンハンサーの開口部を含む）が設定された部分に開口部が配置され、且つフォトマスクにおけるその他の部分に遮光部が配置されているとするマスクデータを作成する。これは、シフター透過光の光強度を正確に算出するための評価用マスクと対応する。図47はステップS11で作成されたマスクデータと対応する評

価用マスクの一例を示している。この評価用マスクを用いた露光において被露光材料上における各評価点 r と対応する位置に投影転写される光強度 $I_o(r)$ を、実使用時の露光機の光学条件を用いた光強度シミュレーション等により再計算する。これにより、シフター透過光の光強度を $T \times I_o(r)$ により正確に見積もることができるので、マスクパターン回折光の光強度（光強度 $I_c(r)$ ）を十分に打ち消せるかどうかを正確に判断することができる。

次に、ステップ S 1 2 において、ステップ S 1 1 で再計算された $I_o(r)$ が最大遮光効果を実現するのに適切な強度になっているか否かを検証する。ここで、マスクエンハンサーの開口部の大きさが最大遮光効果を実現するのに適切な強度の $I_o(r)$ を実現している部分においては、そのままマスクエンハンサーの開口部を決定する。一方、そうでない部分においては、再び、位相シフターの透過率 T と、現時点でマスクエンハンサーにおいて最大遮光効果を実現する最適透過率 $T_e (= I_c(r) / I_o(r))$ との比のみを用いて開口面積率を設定し、該開口面積率に基づいてマスクエンハンサーの開口部の大きさを決定する。具体的には、ステップ S 1 0 で求められた開口部の面積を S_o とすれば、

$$S_o \times I_c(r) / (I_o(r) \times T)$$

で定義される面積 S_o' を新たな開口部の面積として求める。ここで、マスクエンハンサーの開口部の大きさが最大遮光効果を実現しているかどうかは、マスクパターン回折光がシフター透過光によって十分に打ち消されているかどうかによって、言い換えると、 $T \times I_o(r) \div I_c(r)$ が成り立つかどうかによって、判断することができる。従って、 $S_o' = S_o \times I_c(r) / (I_o(r) \times T)$ に従って、シフター透過光が過剰なら開口部を小さくする修正を加えると共にシフター透過光が過小なら開口部を大きくする修正を加えることになる。

次に、ステップ S 1 3 において、ステップ S 1 2 で開口部面積の修正が行なわれたかどうかを判断し、開口部面積の修正が行なわれている場合には、ステップ S 1 4 において、開口部面積 S_o を開口部面積 S_o' によって更新した後、ステ

ップS 1 1に戻る。すなわち、開口部面積の修正内容に基づき、シフター透過光の光強度を正確に算出するための評価用マスクと対応するマスクデータを再作成して光強度 $I_o(r)$ を再計算する処理を、 $I_o(r)$ によって $I_c(r)$ が十分に打ち消されるまで繰り返し行なう。一方、開口部面積の更新が行なわれていない場合には、ステップS 8以降の処理に進む。

第4の実施形態の第1変形例によると、第4の実施形態の効果に加えて、次のような効果が得られる。すなわち、マスクエンハンサーの開口部が十分な遮光効果を実現できるかどうかを確認検証し、その結果に基づき開口部面積を修正するので、マスクエンハンサーにより十分な遮光性を実現できるマスクパターンデータを確実に作成することができる。

尚、第4の実施形態の第1変形例において、パターンレイアウト（分割パターンを含む）に配置される遮光膜又は遮光部は、露光光に対して15%以下の透過率を持つと共に透光部との間で露光光に対して $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じるものであってもよい。

第4の実施形態の第2変形例

以下、本発明の第4の実施形態の第2変形例に係るマスクパターン設計方法、具体的には、第1又は第2の実施形態に係るフォトマスクを作成するためのマスクパターン設計方法について、図面を参照しながら説明する。

図48は第4の実施形態の第2変形例に係るマスクパターン設計方法の各工程を示すフローチャートである。

第4の実施形態の第2変形例が第4の実施形態と異なっている点は次の通りである。すなわち、第4の実施形態においては、マスクパターンとして、位相シフター、マスクエンハンサー及び遮光部を用いたが、第4の実施形態の第2変形例においては、マスクパターンとして、マスクエンハンサーを用いないで、位相シ

フター及び遮光部のみを用いる。

尚、図48に示すように、第4の実施形態の第2変形例におけるステップS1～S5の各処理とステップS9の処理とは、図42に示す、第4の実施形態におけるステップS1～S5の各処理とステップS9の処理と全く同様である。すなわち、第4の実施形態の第2変形例においては、第4の実施形態におけるステップS6～S8の各処理が、ステップS20の処理と置き換えられている。具体的には、第4の実施形態におけるステップS6では、マスクエンハンサーによって実効的に生成される透過率 T_e の範囲を、 $0 < T_{min} \leq T_{max} < T$ で表される T_{min} から T_{max} までに設定したが、第4の実施形態の第2変形例においては $T_{min} = T_{max} = T$ となった状況を想定する。

すなわち、ステップS20において、各評価点 r における光強度 $I_o(r)$ の値と光強度 $I_c(r)$ の値とを用いて、シフター透過光及びマスクパターン回折光のそれぞれの光強度を評価することにより、遮光性を向上させるための条件判断を行なう。このとき、各分割パターンにおいて、 $T/4 > I_c(r)/I_o(r)$ であれば遮光部を設定し、 $I_c(r)/I_o(r) \geq T/4$ であれば位相シフターを設定する。これにより、各分割パターンの遮光性が位相シフターを用いた方が高いか、又は遮光部を用いた方が高いかという簡単な判断に基づいて、各分割パターンの遮光性を向上させることができる。図49(a)は、ステップS4で抽出された、遮光性が十分ではない分割パターンに対して、ステップS20で位相シフターが設定された様子を示している。

尚、第4の実施形態の第2変形例においては、マスクエンハンサーの開口部を設定するステップ（第4の実施形態におけるステップS7の処理）、及びマスクエンハンサーの開口部を含む位相シフターをパターンレイアウトから取り除いて遮光部パターンを作成するステップ（第4の実施形態におけるステップS8の処理）は必要ない。

図49(b)は、第4の実施形態の第2変形例で作成されたマスクパターンデ

ータの一例を示している。

第4の実施形態の第2変形例によると、第4の実施形態の効果に加えて、次のような効果が得られる。すなわち、マスクパターンとして、マスクエンハンサーを用いなくて、位相シフター及び遮光部のみを用いるので、十分な遮光性を実現できるマスクパターンデータを簡単に作成することができる。

尚、第4の実施形態の第2変形例において、パターンレイアウト（分割パターンを含む）に配置される遮光膜又は遮光部は、露光光に対して15%以下の透過率を持つと共に透光部との間で露光光に対して $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じるものであってもよい。

第4の実施形態の第3変形例

以下、本発明の第4の実施形態の第3変形例に係るマスクパターン設計方法、具体的には、第1又は第2の実施形態に係るフォトマスクを作成するためのマスクパターン設計方法について、図面を参照しながら説明する。

図50は第4の実施形態の第3変形例に係るマスクパターン設計方法の各工程を示すフローチャートである。

第4の実施形態の第3変形例が第4の実施形態と異なっている点は、次の通りである。すなわち、第4の実施形態においては、マスクデータを用いた光学シミュレーションの結果に基づいて、遮光性を向上できるマスクパターンの設計を行なった。それに対して、第4の実施形態の第3変形例においては、透過率 T の位相シフターが遮光膜よりも高い遮光性を実現する条件判断は完全ではないが、パターンレイアウト幅に基づいて、遮光性を向上できるマスクパターンの設計を行なう。

具体的には、まず、ステップS1において、第4の実施形態と同様に、所望のパターン（レジストパターン）を形成するためのマスクパターンのパターンレイ

アウトを作成すると共に、マスクパターンに配置される位相シフターの透過率 T を決定する。

次に、ステップ $S30$ において、透過率 T 、幅 L の位相シフターよりなるマスクパターンを用いた露光において被露光材料上におけるマスクパターン中心と対応する位置に投影転写される光強度 $I_h(T, L)$ を、実使用時の露光機の光学条件を用いた光学シミュレーション等により算出する。また、幅 L の遮光膜よりなるマスクパターンを用いた露光において、被露光材料上におけるマスクパターン中心と対応する位置に投影転写される光強度 $I_c(L)$ を、同様の方法により算出する。そして、光強度 $I_h(T, L)$ が光強度 $I_c(L)$ よりも小さくなる最小幅 L 、言い換えると、位相シフターの遮光効果が遮光膜よりも高くなる最大幅 L を臨界幅 L_s として算出する。

次に、ステップ $S31$ において、パターンレイアウトから幅が臨界幅 L_s 以下となる部分パターンを抽出する。

次に、ステップ $S32$ において、ステップ $S31$ で抽出された部分パターンには位相シフターを配置すると共に、それ以外の部分には遮光部を配置する。

最後に、ステップ $S9$ において、第4の実施形態と同様に、遮光部パターンと位相シフターパターンとからなるマスクパターンデータを作成した後、マスクパターンデータを出力してマスクパターン設計を終了する。

第4の実施形態の第3変形例によると、マスクデータを用いた光学シミュレーションを用いることなく、パターンレイアウト幅に基づいて遮光性を向上できるマスクパターンの設計を行なうので、マスクパターン設計が簡単になる。

尚、第4の実施形態の第3変形例において、パターンレイアウト（分割パターンを含む）に配置される遮光膜又は遮光部は、露光光に対して15%以下の透過率を持つと共に透光部との間で露光光に対して $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じるものであってもよい。

第4の実施形態の第4変形例

以下、本発明の第4の実施形態の第4変形例に係るマスクパターン設計方法、具体的には、第1又は第2の実施形態に係るフォトマスクを作成するためのマスクパターン設計方法について、図面を参照しながら説明する。

図51は第4の実施形態の第4変形例に係るマスクパターン設計方法の各工程を示すフローチャートである。

第4の実施形態の第4変形例が第4の実施形態と異なっている点は次の通りである。すなわち、第4の実施形態においては、位相シフターの透過率として1種類の透過率 T を用いたが、第4の実施形態の第4変形例においては、位相シフターの透過率として2種類の透過率 T_1 及び T_2 （但し $T_1 > T_2$ ）を用いる。また、第4の実施形態においては、マスクパターンとして、位相シフター、マスクエンハンサー及び遮光部を用いたが、第4の実施形態の第4変形例においては、第4の実施形態の第2変形例と同様に、マスクパターンとして、マスクエンハンサーを用いなくて、位相シフター及び遮光部のみを用いる。

尚、図51に示すように、第4の実施形態の第4変形例におけるステップS2～S5の各処理とステップS9の処理とは、図42に示す、第4の実施形態におけるステップS2～S5の各処理とステップS9の処理と全く同様である。すなわち、第4の実施形態の第4変形例においては、第4の実施形態におけるステップS1の処理が、ステップS40の処理と置き換えられていると共に、第4の実施形態におけるステップS6～S8の各処理が、ステップS41及びS42の処理と置き換えられている。

すなわち、ステップS40において、所望のパターン（レジストパターン）を形成するためのマスクパターンのパターンレイアウトを作成すると共に、マスクパターンに配置される位相シフターの2種類の透過率 T_1 及び T_2 （但し $T_1 > T_2$ ）を決定する。

また、ステップS2～S5の各処理を行なった後、ステップS41において、各評価点rにおける光強度 $I_o(r)$ の値と光強度 $I_c(r)$ の値とを用いて、シフター透過光及びマスクパターン回折光のそれぞれの光強度を評価することにより、遮光性を向上させるための条件判断を行なう。このとき、各分割パターンにおいて、 $T2/4 > I_c(r)/I_o(r)$ であれば遮光部を設定し、 $I_c(r)/I_o(r) \geq T2/4$ であれば位相シフターを設定する。すなわち、使用可能な位相シフターの中で最も透過率の低い位相シフターを基準にして、該位相シフターを用いることによって遮光膜よりも遮光性を向上させられる部分を最初に抽出しておく。なぜなら、より高い透過率の位相シフターを用いることによって遮光膜よりも遮光性を向上させらる部分は、それより低い透過率の位相シフターを用いることによって遮光膜よりも遮光性を向上させらる部分の内側に限定されるからである。尚、ステップS41の処理は、図48に示す、第4の実施形態の第2変形例におけるステップS20の処理において、単一の透過率Tを、使用可能な透過率の最低値(T2)に置き換えた処理になっている。

次に、ステップS42において、位相シフターが設定された各分割パターンにおいて、どちらの透過率の位相シフターを用いるのが適切かを判断する。このとき、第1の実施形態で説明したように、

$$I_c / I_o > (T1^{0.5} + T2^{0.5}) \times (T1^{0.5} + T2^{0.5}) / 2$$

が成り立つマスクパターン部分においては透過率T1の位相シフターを選択し、

$$I_c / I_o \leq (T1^{0.5} + T2^{0.5}) \times (T1^{0.5} + T2^{0.5}) / 2$$

が成り立つマスクパターン部分においては透過率T2の位相シフターを選択すればよい。図52(a)は、ステップS4で抽出された、遮光性が十分ではない分割パターンに対して、ステップS41及びS42で2種類の透過率T1及びT2を有する位相シフターが設定された様子を示している。

尚、第4の実施形態の第4変形例においては、マスクエンハンサーの開口部を設定するステップ(第4の実施形態におけるステップS7の処理)、及びマスク

エンハンサーの開口部を含む位相シフターをパターンレイアウトから取り除いて遮光部パターンを作成するステップ（第4の実施形態におけるステップS8の処理）は必要ない。

図52（b）は、第4の実施形態の第4変形例で作成されたマスクパターンデータの一例を示している。

第4の実施形態の第4変形例によると、第4の実施形態の効果に加えて、次のような効果が得られる。すなわち、マスクパターンとして、マスクエンハンサーを用いなくて、位相シフター及び遮光部のみを用いるので、十分な遮光性を実現できるマスクパターンデータを簡単に作成することができる。また、複数の透過率を有する位相シフターが使用可能な状況において、より高い遮光性を実現されるように各透過率を有する位相シフターを設定できるので、異なる透過率の位相シフターを適切な位置に配置することができる。

尚、第4の実施形態の第4変形例において、位相シフターの透過率が3種類以上であってもよい。

また、第4の実施形態の第4変形例において、パターンレイアウト（分割パターンを含む）に配置される遮光膜又は遮光部は、露光光に対して15%以下の透過率を持つと共に透光部との間で露光光に対して $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下（但しnは整数）の位相差を生じるものであってもよい。

請求の範囲

1. 露光光に対して透光性を有する透過性基板上に、前記露光光に対して遮光性を有するマスクパターンが設けられたフォトマスクであって、

前記マスクパターンは、前記透過性基板における前記マスクパターンが形成されていない透光部との間で前記露光光に対して $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じる位相シフターを有しており、

前記位相シフターを透過する前記露光光によって被露光材料上における前記マスクパターンと対応する遮光像形成領域に生じる第1の光強度が、前記透過性基板における前記マスクパターンの周辺部を透過して前記マスクパターンの裏側に回り込む前記露光光によって前記遮光像形成領域に生じる第2の光強度の4倍以下であることを特徴とするフォトマスク。

2. 請求項1において、

前記位相シフターは、前記露光光に対して前記透過性基板とは異なる透過率を有する透過性膜が前記透過性基板上に形成されてなることを特徴とするフォトマスク。

3. 請求項1において、

前記位相シフターは、前記透過性基板が彫り込まれてなることを特徴とするフォトマスク。

4. 請求項1において、

前記マスクパターンは同じ外形形状の遮光膜を有しており、

前記位相シフターは前記遮光膜に設けられた開口部に配置されていることを特

徴とするフォトマスク。

5. 請求項 4 において、

前記同じ外形形状の遮光膜は、前記露光光に対して 15% 以下の透過率を持つと共に前記透光部との間で前記露光光に対して $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じることを特徴とするフォトマスク。

6. 露光光に対して透光性を有する透過性基板上に、前記露光光に対して遮光性を有するマスクパターンが設けられたフォトマスクであって、

前記マスクパターンは、前記透過性基板における前記マスクパターンが形成されていない透光部との間で前記露光光に対して $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じる位相シフターを有しており、

前記位相シフターを透過する前記露光光によって被露光材料上における前記マスクパターンと対応する遮光像形成領域に生じる第 1 の光強度が、前記透過性基板における前記マスクパターンの周辺部を透過して前記マスクパターンの裏側に回り込む前記露光光によって前記遮光像形成領域に生じる第 2 の光強度の 0.5 倍以上で且つ 2 倍以下であることを特徴とするフォトマスク。

7. 請求項 6 において、

前記位相シフターは、前記露光光に対して前記透過性基板とは異なる透過率を有する透過性膜が前記透過性基板上に形成されてなることを特徴とするフォトマスク。

8. 請求項 6 において、

前記位相シフターは、前記透過性基板が彫り込まれてなることを特徴とするフォトマスク。

9. 請求項6において、

前記マスクパターンは同じ外形形状の遮光膜を有しており、

前記位相シフターは前記遮光膜に設けられた開口部に配置されていることを特徴とするフォトマスク。

10. 請求項9において、

前記同じ外形形状の遮光膜は、前記露光光に対して15%以下の透過率を持つと共に前記透光部との間で前記露光光に対して $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下（但しnは整数）の位相差を生じることを特徴とするフォトマスク。

11. 請求項1に記載のフォトマスクを用いたパターン形成方法であって、

基板上にポジ型のレジスト膜を形成する工程と、

前記レジスト膜に前記フォトマスクを介して前記露光光を照射する工程と、

前記露光光を照射された前記レジスト膜を現像して、前記レジスト膜における前記マスクパターンと対応する部分以外の他の部分を除去することにより、レジストパターンを形成する工程とを備え、

前記レジスト膜における前記マスクパターンと対応する部分の幅をLとしたときに、

$$L \leq 0.4 \times \lambda / NA$$

（但し、 λ は前記露光光の波長であり、NAは露光機の縮小投影光学系の開口数である）

であることを特徴とするパターン形成方法。

1 2 . 請求項 1 1 において、

前記露光光を照射する工程は斜入射照明法を用いることを特徴とするパターン形成方法。

1 3 . 請求項 1 2 において、

前記露光光の前記フォトマスクに対する入射方向は、前記レジスト膜に照射される前記露光光の強度が、前記レジスト膜における前記マスクパターンと対応する部分で最小値を有するように設定されていることを特徴とするパターン形成方法。

1 4 . 請求項 1 2 において、

前記露光光の前記フォトマスクに対する入射方向は、前記レジスト膜に照射される前記露光光の強度が、前記レジスト膜における前記マスクパターンと対応する部分で最小値を有すると共に該最小値がデフォーカス位置でベストフォーカス位置よりも小さくなるように設定されていることを特徴とするパターン形成方法。

1 5 . 請求項 1 に記載のフォトマスクを用いたパターン形成方法であって、

基板上にネガ型のレジスト膜を形成する工程と、

前記レジスト膜に前記フォトマスクを介して前記露光光を照射する工程と、

前記露光光を照射された前記レジスト膜を現像して、前記レジスト膜における前記マスクパターンと対応する部分を除去することにより、レジストパターンを形成する工程とを備え、

前記レジスト膜における前記マスクパターンと対応する部分の幅を L としたときに、

$$L \leq 0.4 \times \lambda / NA$$

(但し、 λ は前記露光光の波長であり、 NA は露光機の縮小投影光学系の開口数である)

であることを特徴とするパターン形成方法。

16. 請求項15において、

前記露光光を照射する工程は斜入射照明法を用いることを特徴とするパターン形成方法。

17. 請求項16において、

前記露光光の前記フォトマスクに対する入射方向は、前記レジスト膜に照射される前記露光光の強度が、前記レジスト膜における前記マスクパターンと対応する部分で最小値を有するように設定されていることを特徴とするパターン形成方法。

18. 請求項16において、

前記露光光の前記フォトマスクに対する入射方向は、前記レジスト膜に照射される前記露光光の強度が、前記レジスト膜における前記マスクパターンと対応する部分で最小値を有すると共に該最小値がデフォーカス位置でベストフォーカス位置よりも小さくなるように設定されていることを特徴とするパターン形成方法。

19. 請求項2に記載のフォトマスクを用いたパターン形成方法であって、

基板上にポジ型のレジスト膜を形成する工程と、

前記レジスト膜に前記フォトマスクを介して前記露光光を照射する工程と、

前記露光光を照射された前記レジスト膜を現像して、前記レジスト膜における前記マスクパターンと対応する部分以外の他の部分を除去することにより、レジ

ストパターンを形成する工程とを備え、

前記レジスト膜における前記マスクパターンと対応する部分の幅を L としたときに、

$$L \leq 0.4 \times \lambda / NA$$

(但し、 λ は前記露光光の波長であり、 NA は露光機の縮小投影光学系の開口数である)

であることを特徴とするパターン形成方法。

20. 請求項19において、

前記露光光を照射する工程は斜入射照明法を用いることを特徴とするパターン形成方法。

21. 請求項20において、

前記露光光の前記フォトマスクに対する入射方向は、前記レジスト膜に照射される前記露光光の強度が、前記レジスト膜における前記マスクパターンと対応する部分で最小値を有するように設定されていることを特徴とするパターン形成方法。

22. 請求項20において、

前記露光光の前記フォトマスクに対する入射方向は、前記レジスト膜に照射される前記露光光の強度が、前記レジスト膜における前記マスクパターンと対応する部分で最小値を有すると共に該最小値がデフォーカス位置でベストフォーカス位置よりも小さくなるように設定されていることを特徴とするパターン形成方法。

23. 請求項2に記載のフォトマスクを用いたパターン形成方法であって、

基板上にネガ型のレジスト膜を形成する工程と、
前記レジスト膜に前記フォトマスクを介して前記露光光を照射する工程と、
前記露光光を照射された前記レジスト膜を現像して、前記レジスト膜における
前記マスクパターンと対応する部分を除去することにより、レジストパターンを
形成する工程とを備え、

前記レジスト膜における前記マスクパターンと対応する部分の幅を L としたと
きに、

$$L \leq 0.4 \times \lambda / NA$$

(但し、 λ は前記露光光の波長であり、 NA は露光機の縮小投影光学系の開口
数である)

であることを特徴とするパターン形成方法。

24. 請求項23において、

前記露光光を照射する工程は斜入射照明法を用いることを特徴とするパターン
形成方法。

25. 請求項24において、

前記露光光の前記フォトマスクに対する入射方向は、前記レジスト膜に照射さ
れる前記露光光の強度が、前記レジスト膜における前記マスクパターンと対応す
る部分で最小値を有するように設定されていることを特徴とするパターン形成方
法。

26. 請求項24において、

前記露光光の前記フォトマスクに対する入射方向は、前記レジスト膜に照射さ
れる前記露光光の強度が、前記レジスト膜における前記マスクパターンと対応す
る部分で最小値を有すると共に該最小値がデフォーカス位置でベストフォーカス

位置よりも小さくなるように設定されていることを特徴とするパターン形成方法。

27. 露光光に対して透光性を有する透過性基板上に、前記露光光に対して遮光性を有するマスクパターンが設けられたフォトマスクの作成方法であって、

前記マスクパターンとなる領域に、前記透過性基板における前記マスクパターンが形成されていない透光部との間で前記露光光に対して $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じる位相シフターを形成する工程を備え、

前記位相シフターを形成する工程は、前記位相シフターを透過する前記露光光によって被露光材料上における前記マスクパターンと対応する遮光像形成領域に生じる第1の光強度が、前記透過性基板における前記マスクパターンの周辺部を透過して前記マスクパターンの裏側に回り込む前記露光光によって前記遮光像形成領域に生じる第2の光強度に比例するように前記位相シフターを形成する工程を含むことを特徴とするフォトマスクの作成方法。

28. 請求項27において、

前記位相シフターは、前記露光光に対して前記透過性基板と異なる透過率を有しており、

前記位相シフターを形成する工程は、前記第1の光強度が前記第2の光強度の4倍以下になるように前記位相シフターの形成位置及び前記透過率を決定する工程を含むことを特徴とするフォトマスクの作成方法。

29. 請求項27において、

前記位相シフターは、前記露光光に対して前記透過性基板と異なる透過率を有しており、

前記位相シフターを形成する工程は、前記第1の光強度が前記第2の光強度の0.5倍以上で且つ2倍以下になるように前記位相シフターの形成位置及び前記透過率を決定する工程を含むことを特徴とするフォトマスクの作成方法。

30. 請求項27において、

前記マスクパターンは同じ外形形状の遮光膜を有しており、

前記位相シフターは前記遮光膜に設けられた開口部に配置されており、

前記位相シフターを形成する工程は、前記第1の光強度が所定値と等しくなるように前記開口部の幅を決定する工程を含むことを特徴とするフォトマスクの作成方法。

31. 請求項30において、

前記マスクパターンの幅を L_m としたときに、

$$L_m \leq (0.5 \times \lambda / NA) \times M$$

(但し、 λ は前記露光光の波長であり、 NA は露光機の縮小投影光学系の開口数であり、 M は該縮小投影光学系の倍率である)
であることを特徴とするフォトマスクの作成方法。

32. 請求項27において、

前記マスクパターンは同じ外形形状の遮光膜を有しており、

前記位相シフターは前記遮光膜に設けられた開口部に配置されており、

前記位相シフターを形成する工程は、前記第1の光強度が前記第2の光強度の4倍以下になるように前記開口部の幅を決定する工程を含むことを特徴とするフォトマスクの作成方法。

33. 請求項32において、

前記マスクパターンの幅を L_m としたときに、

$$L_m \leq (0.5 \times \lambda / NA) \times M$$

(但し、 λ は前記露光光の波長であり、 NA は露光機の縮小投影光学系の開口数であり、 M は該縮小投影光学系の倍率である)
であることを特徴とするフォトマスクの作成方法。

34. 請求項27において、

前記マスクパターンは同じ外形形状の遮光膜を有しており、

前記位相シフターは前記遮光膜に設けられた開口部に配置されており、

前記位相シフターを形成する工程は、前記第1の光強度が前記第2の光強度の0.5倍以上で且つ2倍以下になるように前記開口部の幅を決定する工程を含むことを特徴とするフォトマスクの作成方法。

35. 請求項34において、

前記マスクパターンの幅を L_m としたときに、

$$L_m \leq (0.5 \times \lambda / NA) \times M$$

(但し、 λ は前記露光光の波長であり、 NA は露光機の縮小投影光学系の開口数であり、 M は該縮小投影光学系の倍率である)
であることを特徴とするフォトマスクの作成方法。

36. 露光光に対して透光性を有する透過性基板上に、前記露光光に対して遮光性を有するマスクパターンが設けられたフォトマスクの作成方法であって、

前記マスクパターンとなる領域に、前記透過性基板における前記マスクパターンが形成されていない透光部との間で前記露光光に対して $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下 (但し n は整数) の位相差を生じる位相シフターを形成する工程を備え、

前記位相シフターを形成する工程は、前記透過性基板における前記マスクパターンの周辺部が遮光膜によって覆われているとしたときに前記フォトマスクを透過する前記露光光によって被露光材料上における前記マスクパターンと対応する遮光像形成領域に生じる第1の光強度が、前記マスクパターンが遮光膜のみによって構成されているとしたときに前記フォトマスクを透過する前記露光光によって前記遮光像形成領域に生じる第2の光強度に比例するように前記位相シフターを形成する工程を含むことを特徴とするフォトマスクの作成方法。

37. 請求項36において、

前記マスクパターンを構成する遮光膜は、前記露光光に対して15%以下の透過率を持つと共に前記透光部との間で前記露光光に対して $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じることを特徴とするフォトマスクの作成方法。

38. 請求項36において、

前記位相シフターは、前記露光光に対して前記透過性基板と異なる透過率を有しており、

前記位相シフターを形成する工程は、前記第1の光強度が前記第2の光強度の4倍以下になるように前記位相シフターの形成位置及び前記透過率を決定する工程を含むことを特徴とするフォトマスクの作成方法。

39. 請求項36において、

前記位相シフターは、前記露光光に対して前記透過性基板と異なる透過率を有しており、

前記位相シフターを形成する工程は、前記第1の光強度が前記第2の光強度の0.5倍以上で且つ2倍以下になるように前記位相シフターの形成位置及び前記

透過率を決定する工程を含むことを特徴とするフォトマスクの作成方法。

40. 請求項36において、

前記マスクパターンは同じ外形形状の遮光膜を有しており、

前記位相シフターは前記遮光膜に設けられた開口部に配置されており、

前記位相シフターを形成する工程は、前記第1の光強度が所定値と等しくなるように前記開口部の幅を決定する工程を含むことを特徴とするフォトマスクの作成方法。

41. 請求項40において、

前記マスクパターンの幅を L_m としたときに、

$$L_m \leq (0.5 \times \lambda / NA) \times M$$

(但し、 λ は前記露光光の波長であり、 NA は露光機の縮小投影光学系の開口数であり、 M は該縮小投影光学系の倍率である)

であることを特徴とするフォトマスクの作成方法。

42. 請求項36において、

前記マスクパターンは同じ外形形状の遮光膜を有しており、

前記位相シフターは前記遮光膜に設けられた開口部に配置されており、

前記位相シフターを形成する工程は、前記第1の光強度が前記第2の光強度の4倍以下になるように前記開口部の幅を決定する工程を含むことを特徴とするフォトマスクの作成方法。

43. 請求項42において、

前記マスクパターンの幅を L_m としたときに、

$$L_m \leq (0.5 \times \lambda / NA) \times M$$

(但し、 λ は前記露光光の波長であり、 NA は露光機の縮小投影光学系の開口数であり、 M は該縮小投影光学系の倍率である)
であることを特徴とするフォトマスクの作成方法。

44. 請求項36において、

前記マスクパターンは同じ外形形状の遮光膜を有しており、

前記位相シフターは前記遮光膜に設けられた開口部に配置されており、

前記位相シフターを形成する工程は、前記第1の光強度が前記第2の光強度の0.5倍以上で且つ2倍以下になるように前記開口部の幅を決定する工程を含むことを特徴とするフォトマスクの作成方法。

45. 請求項44において、

前記マスクパターンの幅を L_m としたときに、

$$L_m \leq (0.5 \times \lambda / NA) \times M$$

(但し、 λ は前記露光光の波長であり、 NA は露光機の縮小投影光学系の開口数であり、 M は該縮小投影光学系の倍率である)
であることを特徴とするフォトマスクの作成方法。

46. 露光光に対して透光性を有する透過性基板上に、前記露光光に対して遮光性を有するマスクパターンが設けられたフォトマスクの作成方法であって、

前記マスクパターンとなる領域に、前記透過性基板における前記マスクパターンが形成されていない透光部との間で前記露光光に対して $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下(但し n は整数)の位相差を生じると共に前記露光光に対して透過率 T (但し $0 < T < 1$)を有する位相シフターを形成する工程を備え、

前記位相シフターを形成する工程は、

前記マスクパターンが遮光膜のみによって構成されているとしたときに前記フォトマスクを透過する前記露光光によって被露光材料上における前記マスクパターンと対応する遮光像形成領域に生じる光強度 I_a を計算する工程と、

前記透過率 T が 1 であり、且つ前記透過性基板における前記マスクパターンの周辺部が遮光膜によって覆われているとしたときに前記フォトマスクを透過する前記露光光によって前記遮光像形成領域に生じる光強度 I_b を計算する工程と、

$4 \times I_a \geq T \times I_b$ が満たされるように前記位相シフターの形成位置及び前記透過率 T を決定する工程とを含むことを特徴とするフォトマスクの作成方法。

47. 請求項 46 において、

前記マスクパターンを構成する遮光膜は、前記露光光に対して 15% 以下の透過率を持つと共に前記透光部との間で前記露光光に対して $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じることを特徴とするフォトマスクの作成方法。

48. 露光光に対して透光性を有する透過性基板上に、前記露光光に対して遮光性を有するマスクパターンが設けられたフォトマスクの作成方法であって、

前記マスクパターンとなる領域に、前記透過性基板における前記マスクパターンが形成されていない透光部との間で前記露光光に対して $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じると共に前記露光光に対して透過率 T （但し $0 < T < 1$ ）を有する位相シフターを形成する工程を備え、

前記位相シフターを形成する工程は、

前記マスクパターンが遮光膜のみによって構成されているとしたときに前記フォトマスクを透過する前記露光光によって被露光材料上における前記マスクパターンと対応する遮光像形成領域に生じる光強度 I_a を計算する工程と、

前記透過率 T が 1 であり、且つ前記透過性基板における前記マスクパターンの周辺部が遮光膜によって覆われているとしたときに前記フォトマスクを透過する前記露光光によって前記遮光像形成領域に生じる光強度 I_b を計算する工程と、

$2 \times I_a \geq T \times I_b \geq 0.5 \times I_a$ が満たされるように前記位相シフターの形成位置及び前記透過率 T を決定する工程とを含むことを特徴とするフォトマスクの作成方法。

49. 請求項 48 において、

前記マスクパターンを構成する遮光膜は、前記露光光に対して 15% 以下の透過率を持つと共に前記透光部との間で前記露光光に対して $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じることを特徴とするフォトマスクの作成方法。

50. 露光光に対して透光性を有する透過性基板上に、前記露光光に対して遮光性を有するマスクパターンが設けられたフォトマスクを作成するためのマスクパターン設計方法であって、

前記マスクパターンは、前記透過性基板における前記マスクパターンが形成されていない透光部との間で前記露光光に対して $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じる位相シフターを有しており、

前記マスクパターンのレイアウトであるパターンレイアウトを作成すると共に前記位相シフターの透過率 T を決定する工程と、

前記パターンレイアウトを分割して複数の分割パターンを生成する工程と、

前記パターンレイアウトの全体に遮光膜が配置されているとしたときに前記フォトマスクを透過する前記露光光によって被露光材料上における前記各分割パターンと対応する遮光像形成領域に生じる光強度 I_c を算出する工程と、

前記各分割パターンのうち対応する前記光強度 I_c が所定値よりも大きい分割パターンに開口部が配置され且つ前記フォトマスクにおけるその他の部分の全体に遮光膜が配置されているとしたときに前記フォトマスクを透過する前記露光光によって前記遮光像形成領域に生じる光強度 I_o を算出する工程と、

前記各分割パターンのうち $I_c / I_o > T$ が成り立つ分割パターンには前記位相シフターを配置し、前記各分割パターンのうち $T / 4 > I_c / I_o$ が成り立つ分割パターンには遮光部を配置し、前記各分割パターンのうち $T \geq I_c / I_o \geq T / 4$ が成り立つ分割パターンには、前記位相シフターとなる開口部を有する遮光部を配置する工程とを備えていることを特徴とするマスクパターン設計方法。

51. 請求項50において、

前記パターンレイアウトに配置される遮光膜又は遮光部は、前記露光光に対して15%以下の透過率を持つと共に前記透光部との間で前記露光光に対して $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じることを特徴とするマスクパターン設計方法。

52. 露光光に対して透光性を有する透過性基板上に、前記露光光に対して遮光性を有するマスクパターンが設けられたフォトマスクを作成するためのマスクパターン設計方法であって、

前記マスクパターンは、前記透過性基板における前記マスクパターンが形成されていない透光部との間で前記露光光に対して $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じる位相シフターを有しており、

前記マスクパターンのレイアウトであるパターンレイアウトを作成すると共に前記位相シフターの透過率 T を決定する工程と、

前記パターンレイアウトを分割して複数の分割パターンを生成する工程と、

前記パターンレイアウトの全体に遮光膜が配置されているとしたときに前記フォトマスクを透過する前記露光光によって被露光材料上における前記各分割パターンと対応する遮光像形成領域に生じる光強度 I_c を算出する工程と、

前記各分割パターンのうち対応する前記光強度 I_c が所定値よりも大きい分割パターンに開口部が配置され且つ前記フォトマスクにおけるその他の部分の全体に遮光膜が配置されているとしたときに前記フォトマスクを透過する前記露光光によって前記遮光像形成領域に生じる光強度 I_o を算出する工程と、

前記各分割パターンのうち $I_c / I_o \geq T / 4$ が成り立つ分割パターンには前記位相シフターを配置し、前記各分割パターンのうち $T / 4 > I_c / I_o$ が成り立つ分割パターンには遮光部を配置する工程とを備えていることを特徴とするマスクパターン設計方法。

53. 請求項52において、

前記パターンレイアウトに配置される遮光膜又は遮光部は、前記露光光に対して15%以下の透過率を持つと共に前記透光部との間で前記露光光に対して $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じることを特徴とするマスクパターン設計方法。

54. 露光光に対して透光性を有する透過性基板上に、前記露光光に対して遮光性を有するマスクパターンが設けられたフォトマスクを作成するためのマスクパターン設計方法であって、

前記マスクパターンは、前記透過性基板における前記マスクパターンが形成されていない透光部との間で前記露光光に対して $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じる位相シフターを有しており、

前記マスクパターンのレイアウトであるパターンレイアウトを作成すると共に

前記位相シフターの透過率 T を決定する工程と、

前記露光光に対して前記位相シフターの遮光効果が遮光膜よりも高くなる最大幅 L_{max} を算出する工程と、

前記パターンレイアウトのうち幅が L_{max} よりも大きい部分パターンには遮光部を配置し、前記パターンレイアウトのうち幅が L_{max} 以下の部分パターンには前記位相シフターを配置する工程とを備えていることを特徴とするマスクパターン設計方法。

55. 請求項54において、

前記パターンレイアウトに配置される遮光膜又は遮光部は、前記露光光に対して15%以下の透過率を持つと共に前記透光部との間で前記露光光に対して $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じることを特徴とするマスクパターン設計方法。

56. 露光光に対して透光性を有する透過性基板上に、前記露光光に対して遮光性を有するマスクパターンが設けられたフォトマスクを作成するためのマスクパターン設計方法であって、

前記マスクパターンは、前記透過性基板における前記マスクパターンが形成されていない透光部との間で前記露光光に対して $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じる位相シフターを有しており、

前記マスクパターンのレイアウトであるパターンレイアウトを作成すると共に前記位相シフターの2種類の透過率 T_1 及び T_2 （但し $T_1 > T_2$ ）を決定する工程と、

前記パターンレイアウトを分割して複数の分割パターンを生成する工程と、

前記パターンレイアウトの全体に遮光膜が配置されているとしたときに前記フ

フォトマスクを透過する前記露光光によって被露光材料上における前記各分割パターンと対応する遮光像形成領域に生じる光強度 I_c を算出する工程と、

前記各分割パターンのうち対応する前記光強度 I_c が所定値よりも大きい分割パターンに開口部が配置され且つ前記フォトマスクにおけるその他の部分の全体に遮光膜が配置されているとしたときに前記フォトマスクを透過する前記露光光によって前記遮光像形成領域に生じる光強度 I_o を算出する工程と、

前記各分割パターンのうち $I_c / I_o \geq T_2 / 4$ が成り立つ分割パターンには前記位相シフターを配置し、前記各分割パターンのうち $T_2 / 4 > I_c / I_o$ が成り立つ分割パターンには遮光部を配置する工程と、

前記位相シフターが配置された前記各分割パターンのうち $I_c / I_o > (T_1^{0.5} + T_2^{0.5}) \times (T_1^{0.5} + T_2^{0.5})$ が成り立つ分割パターンにおいては前記位相シフターの透過率を T_1 に設定し、前記位相シフターが配置された前記各分割パターンのうち $I_c / I_o \leq (T_1^{0.5} + T_2^{0.5}) \times (T_1^{0.5} + T_2^{0.5})$ が成り立つ分割パターンにおいては前記位相シフターの透過率を T_2 に設定する工程とを備えていることを特徴とするマスクパターン設計方法。

57. 請求項56において、

前記パターンレイアウトに配置される遮光膜又は遮光部は、前記露光光に対して15%以下の透過率を持つと共に前記透光部との間で前記露光光に対して $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差を生じることを特徴とするマスクパターン設計方法。

Fig. 1

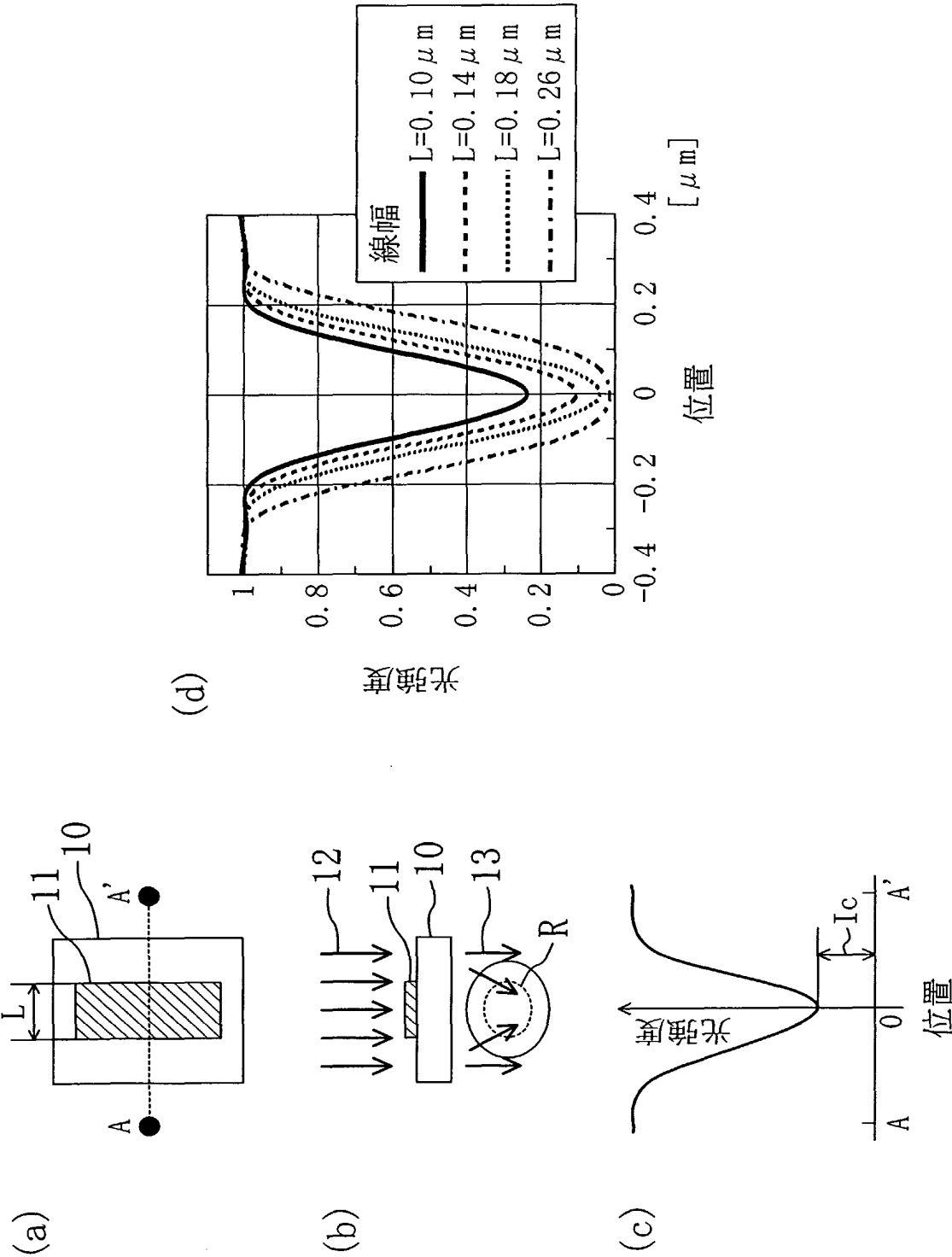


Fig. 2

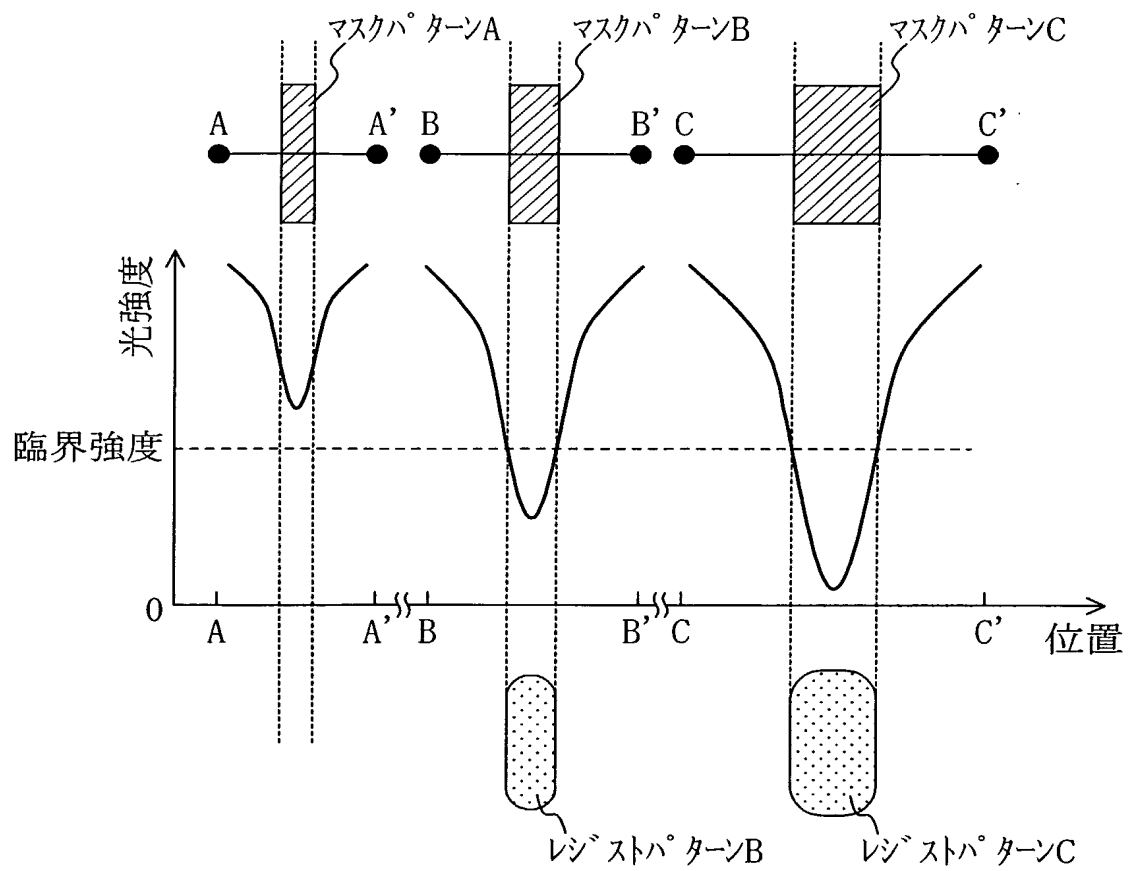


Fig. 3

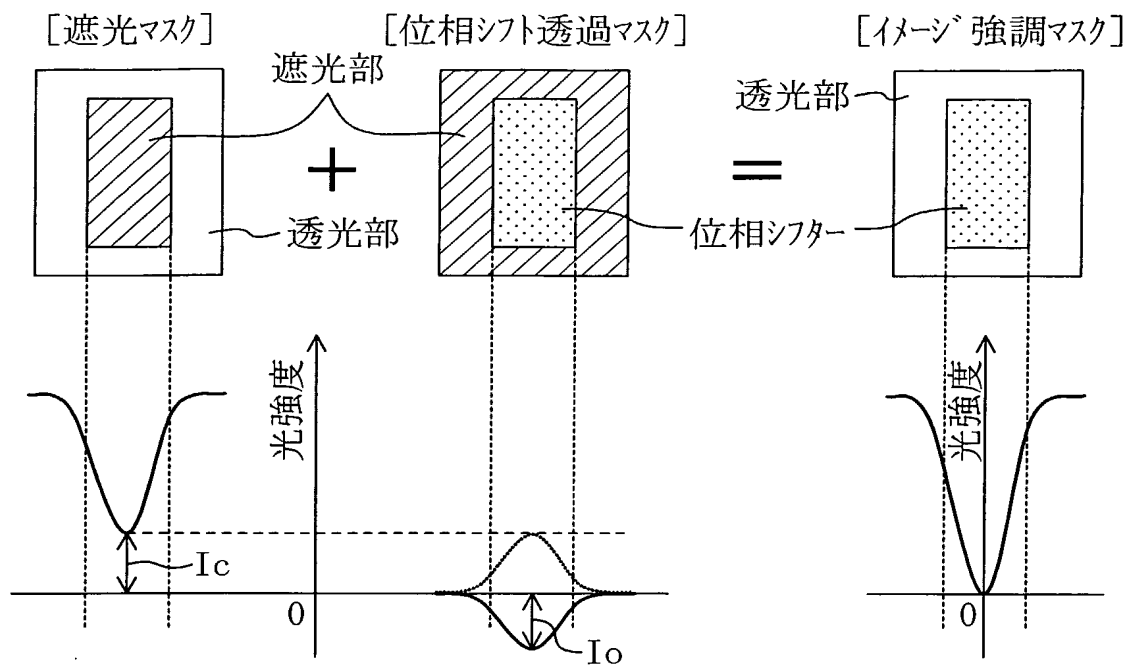


Fig. 4

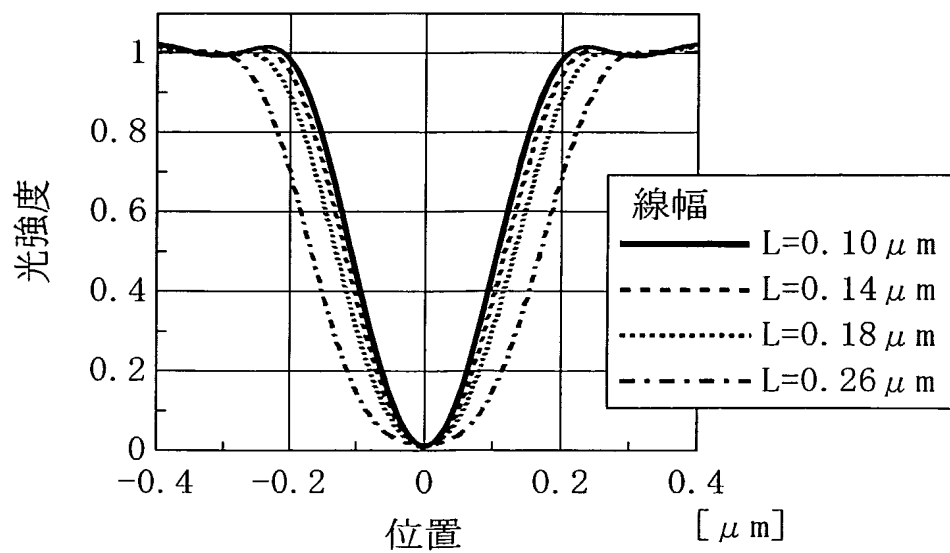


Fig. 5

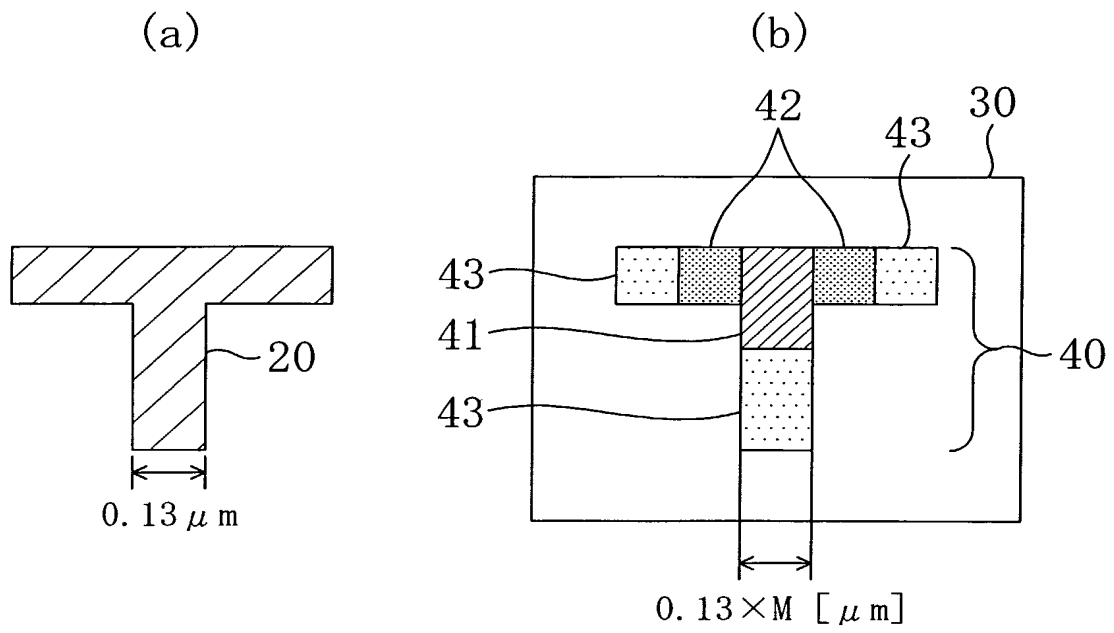


Fig. 6

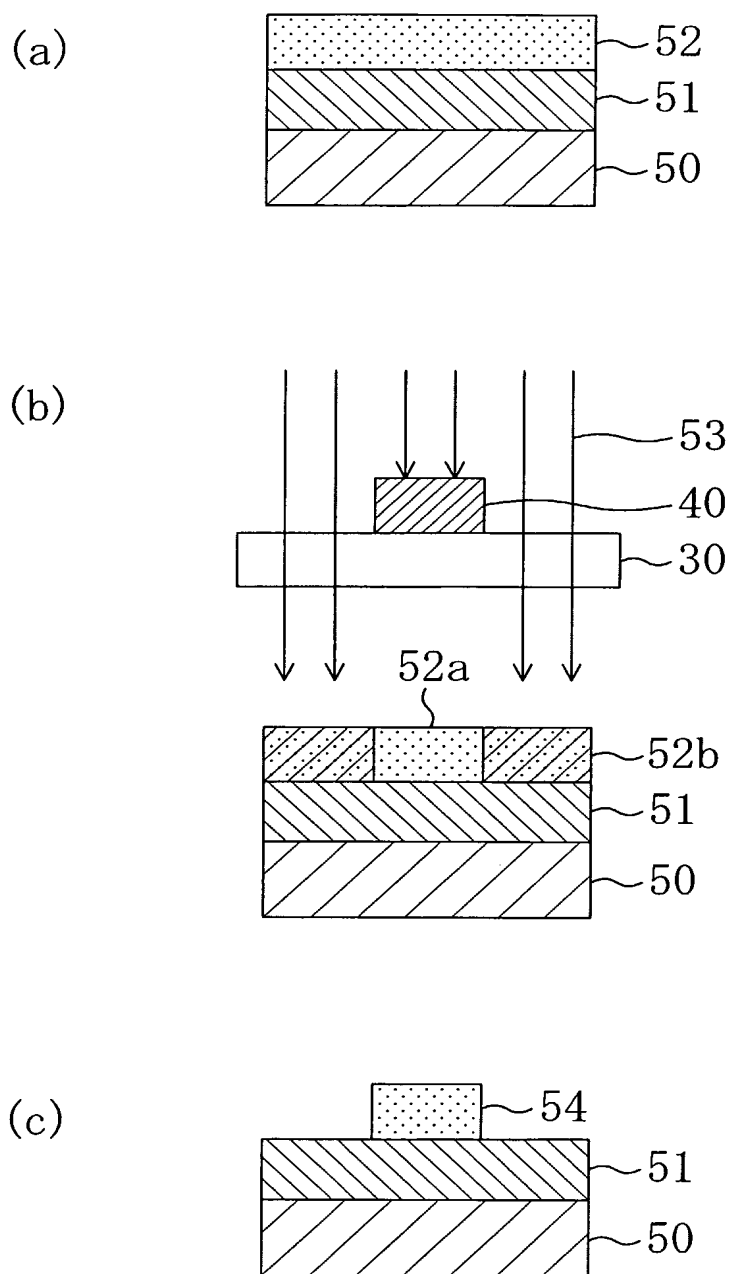


Fig. 7

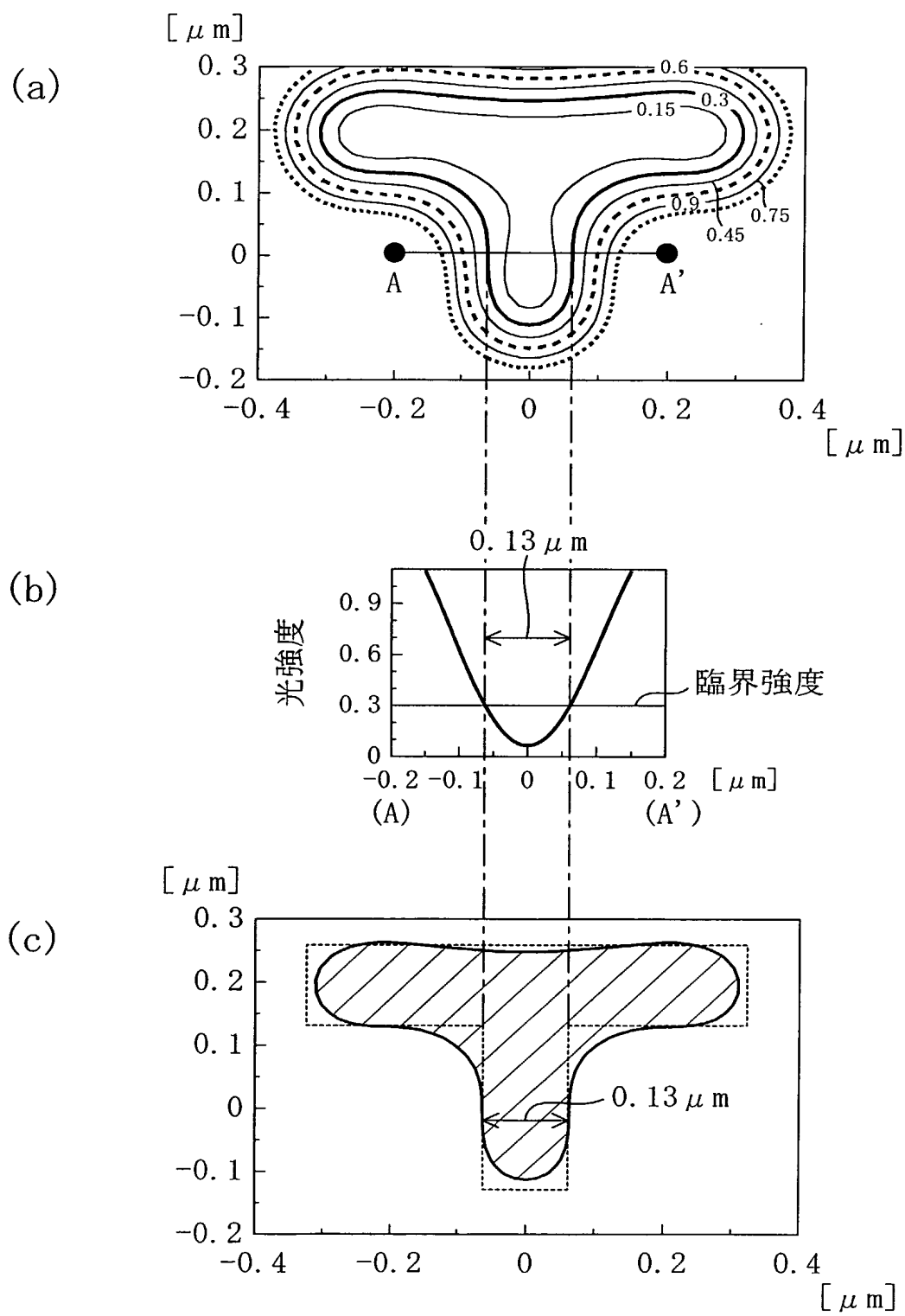


Fig. 8

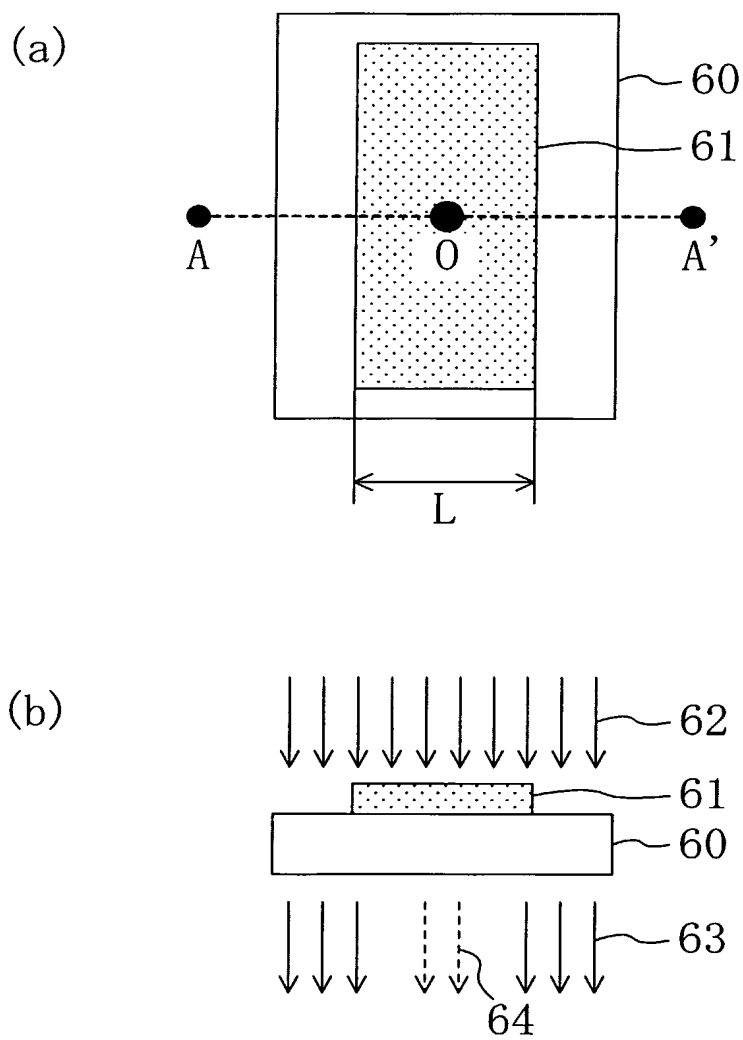


Fig. 9

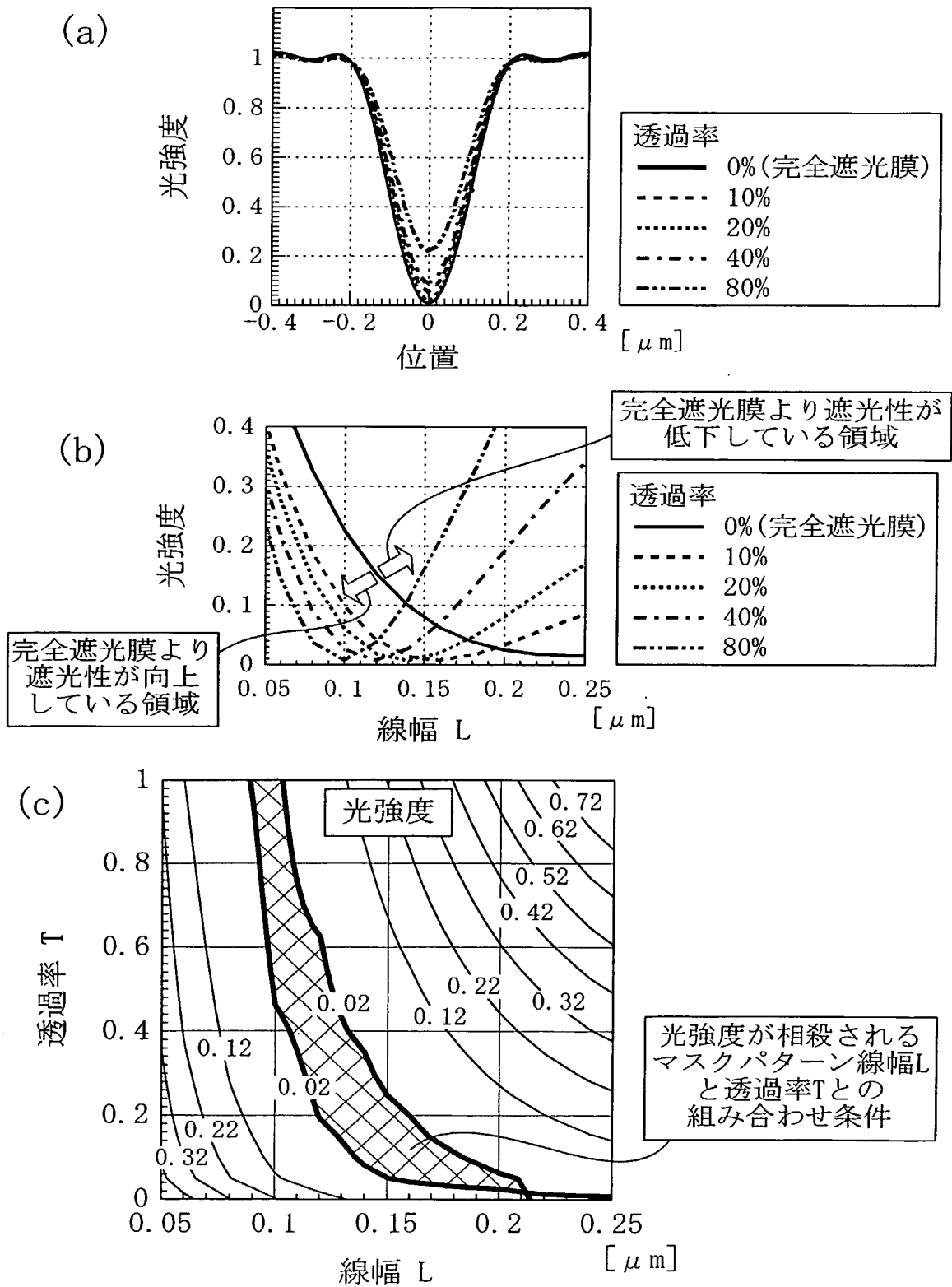


Fig. 10

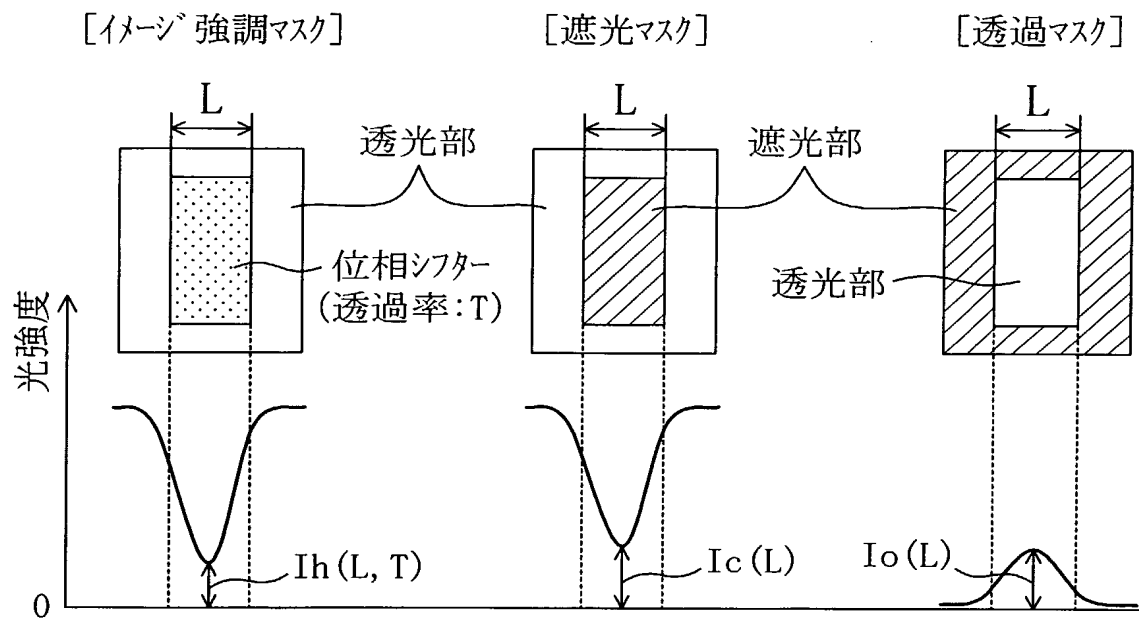
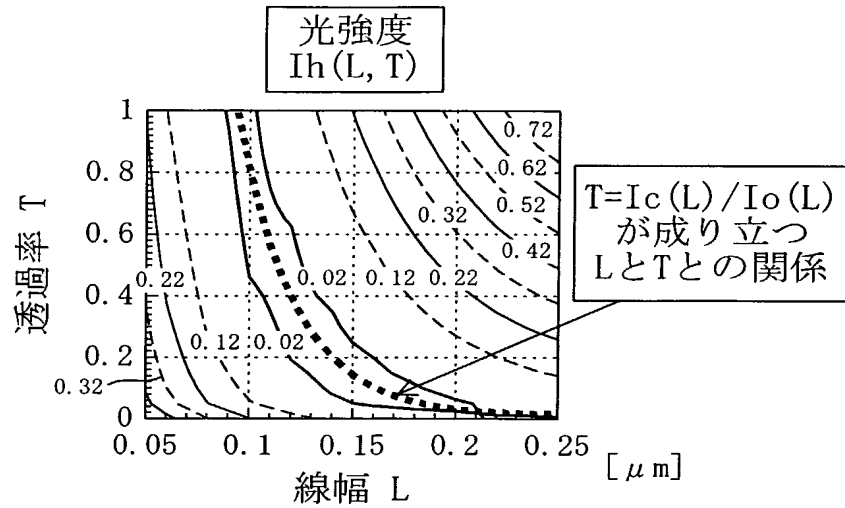
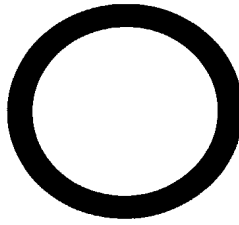


Fig. 11

(a)

通常露光

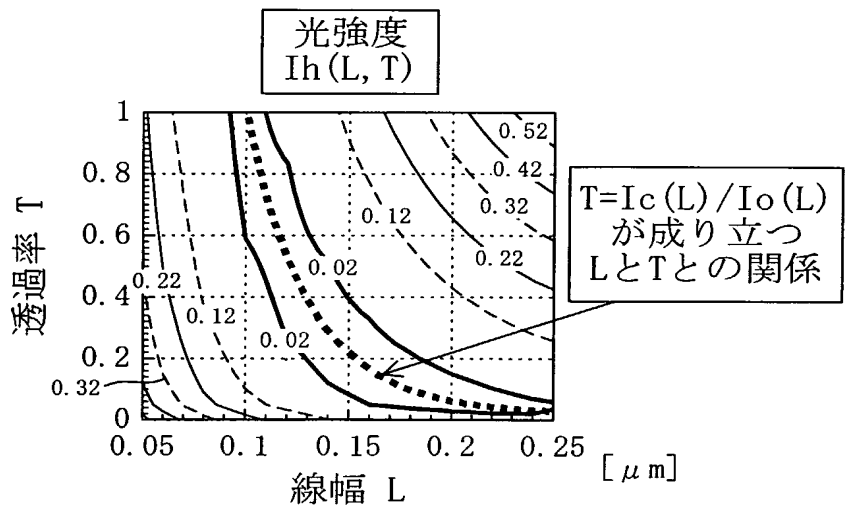
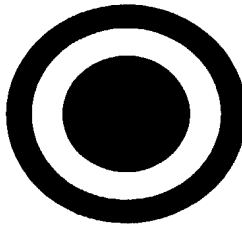
(光源形状)



(b)

輪帯露光

(光源形状)



(c)

四重極露光

(光源形状)

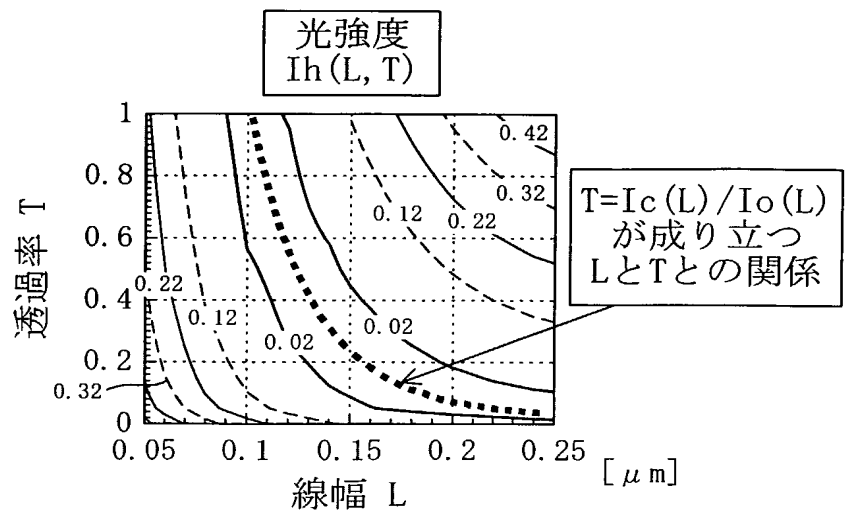
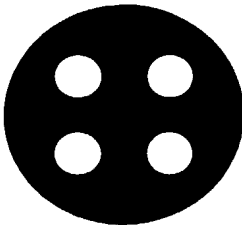


Fig. 12

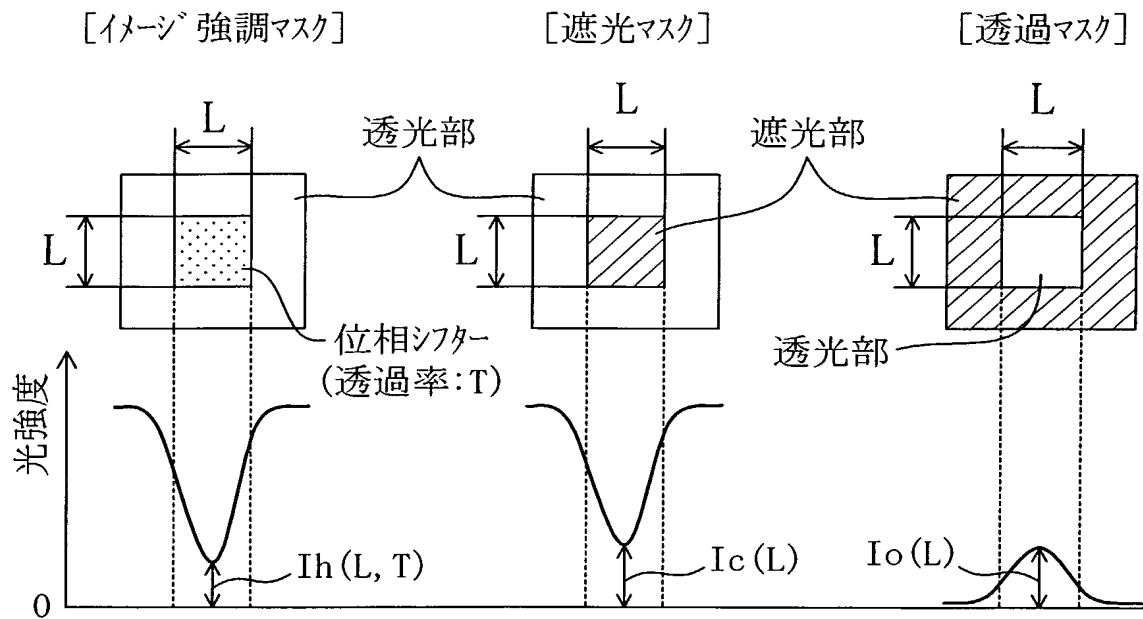
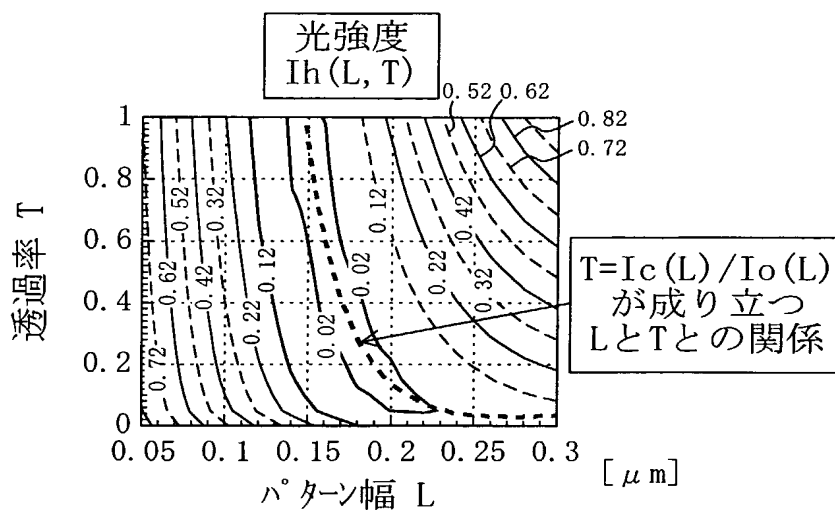
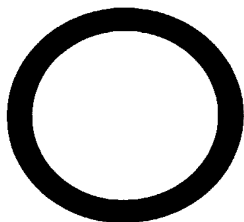


Fig. 13

(a)

通常露光

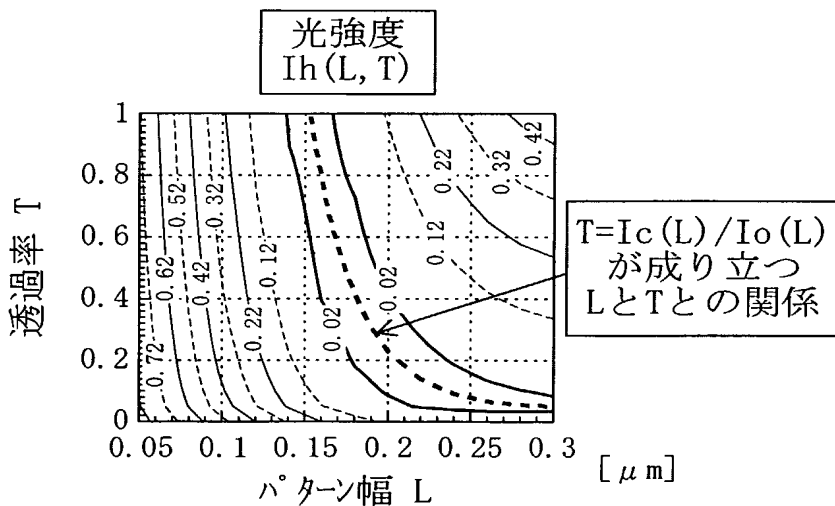
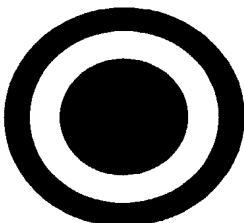
(光源形状)



(b)

輪帯露光

(光源形状)



(c)

四重極露光

(光源形状)

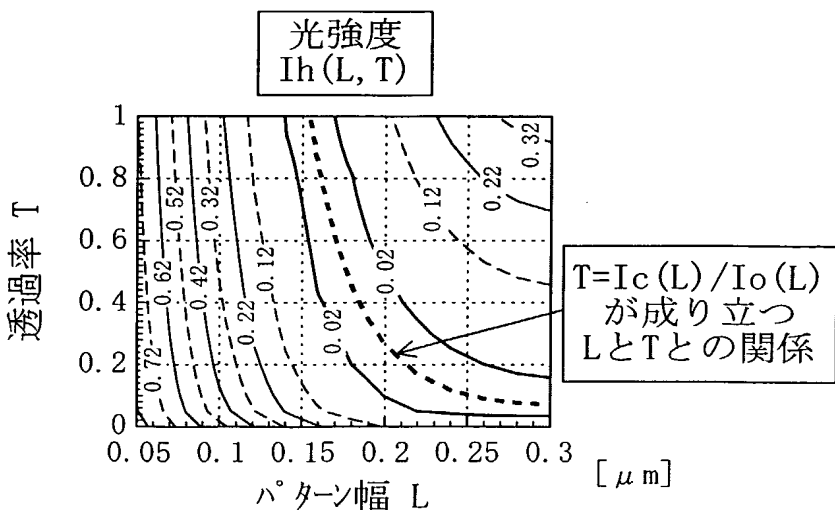
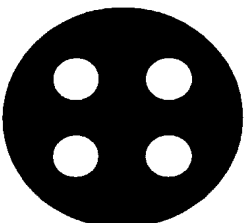
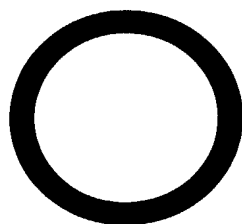
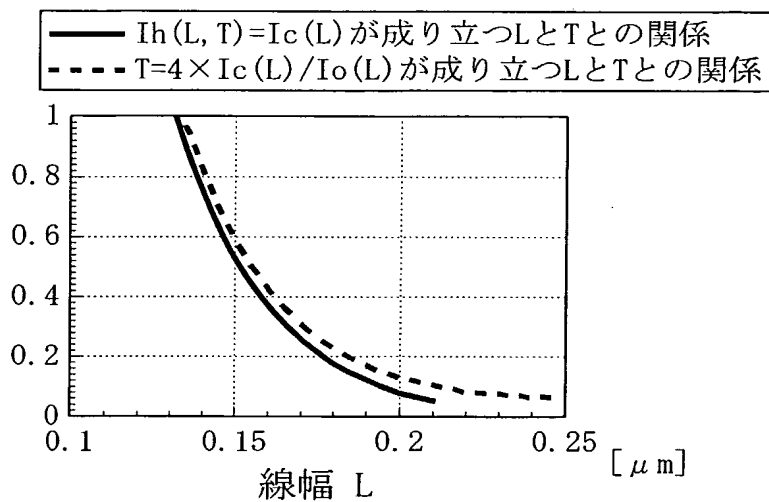


Fig. 14

(a)

通常露光

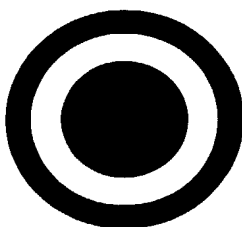
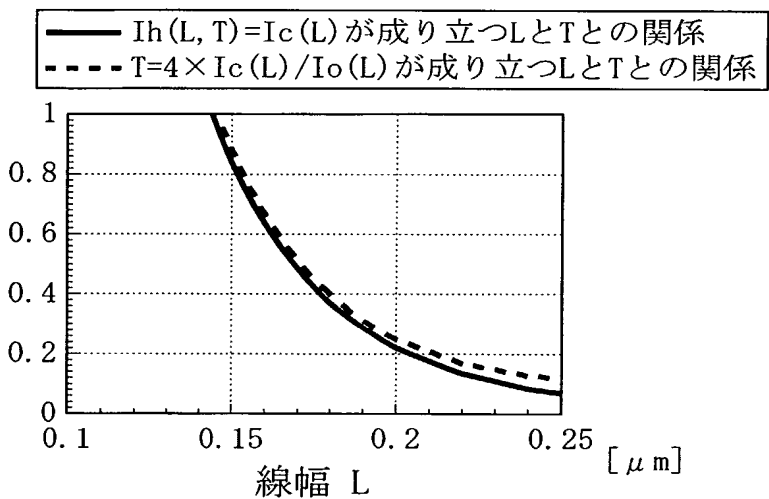
(光源形状)

透過率 T 

(b)

輪帯露光

(光源形状)

透過率 T 

(c)

四重極露光

(光源形状)

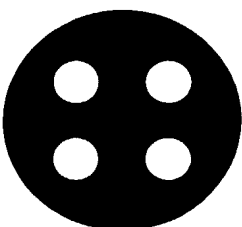
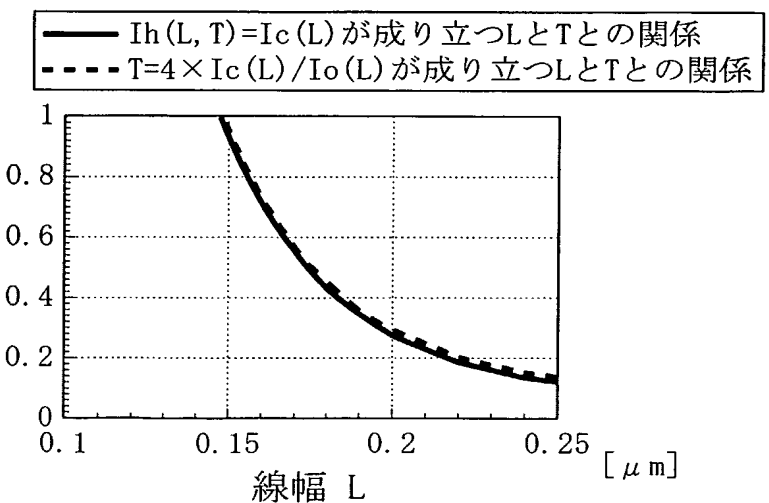
透過率 T 

Fig. 15

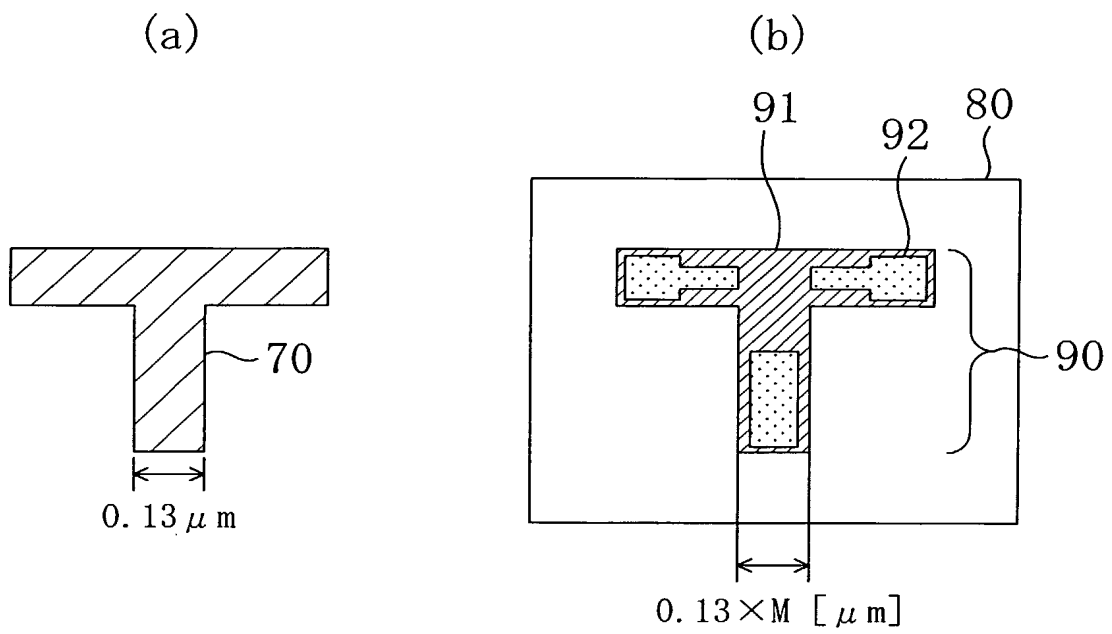


Fig. 16

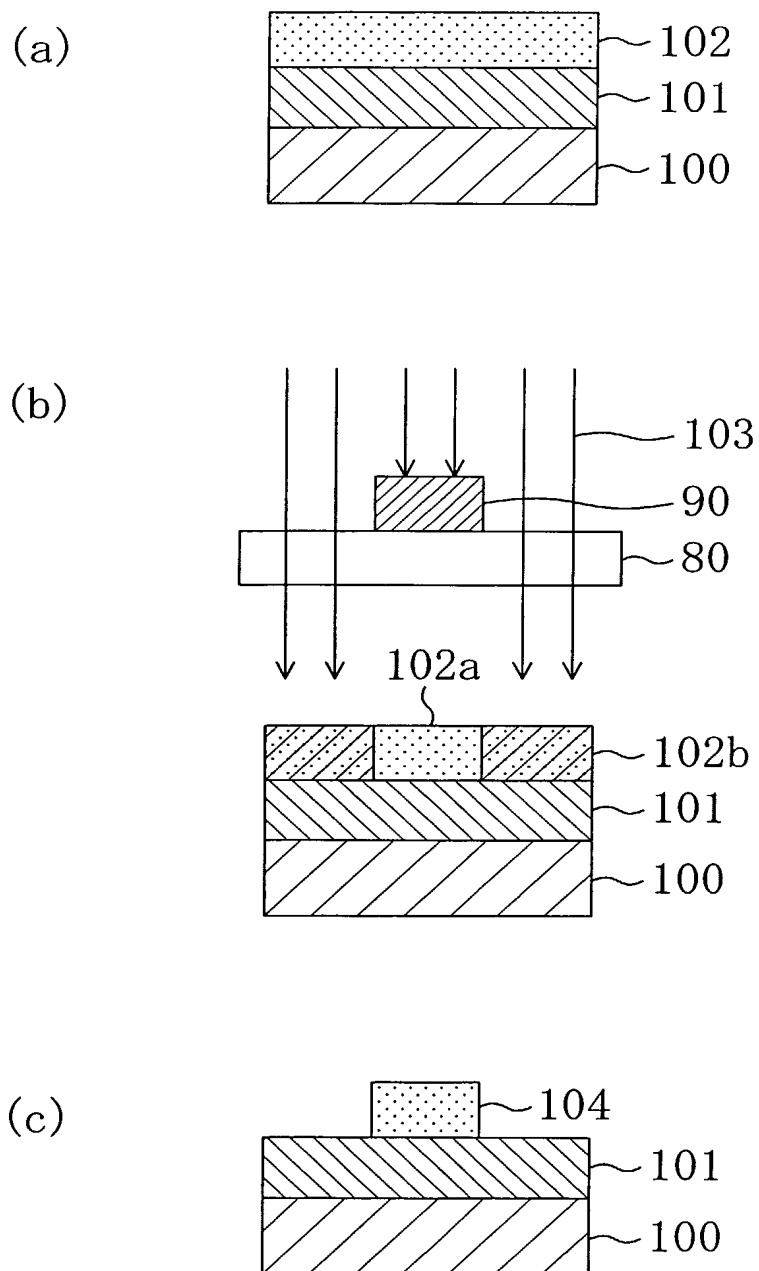


Fig. 17

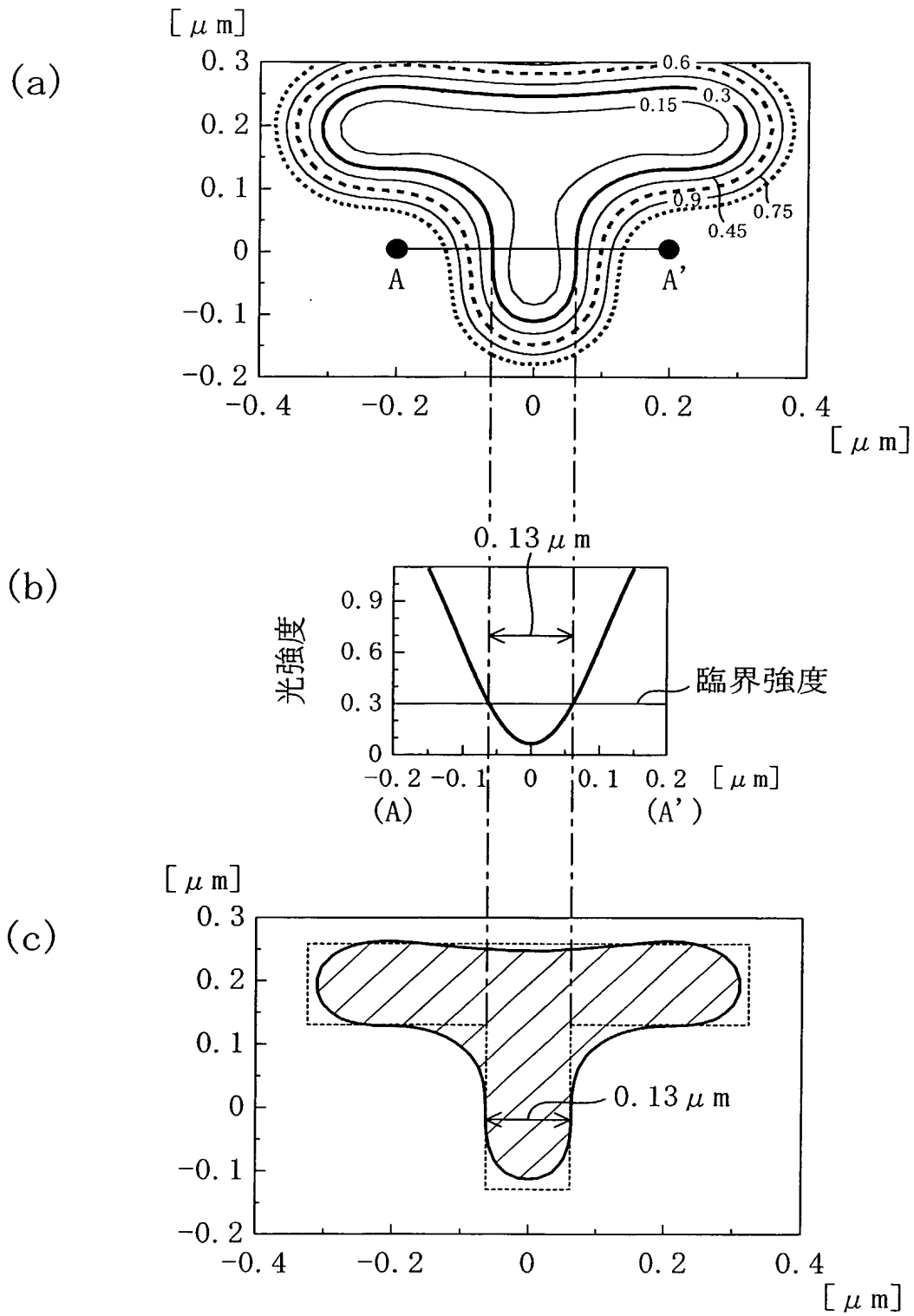


Fig. 18

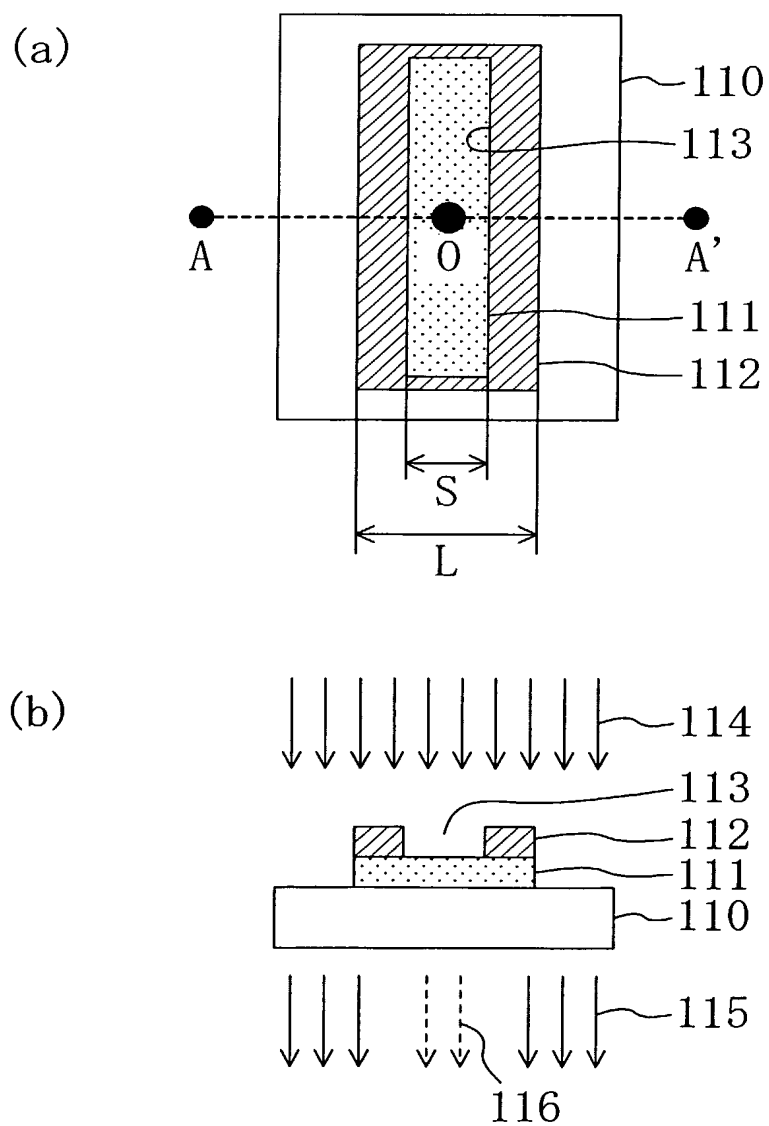
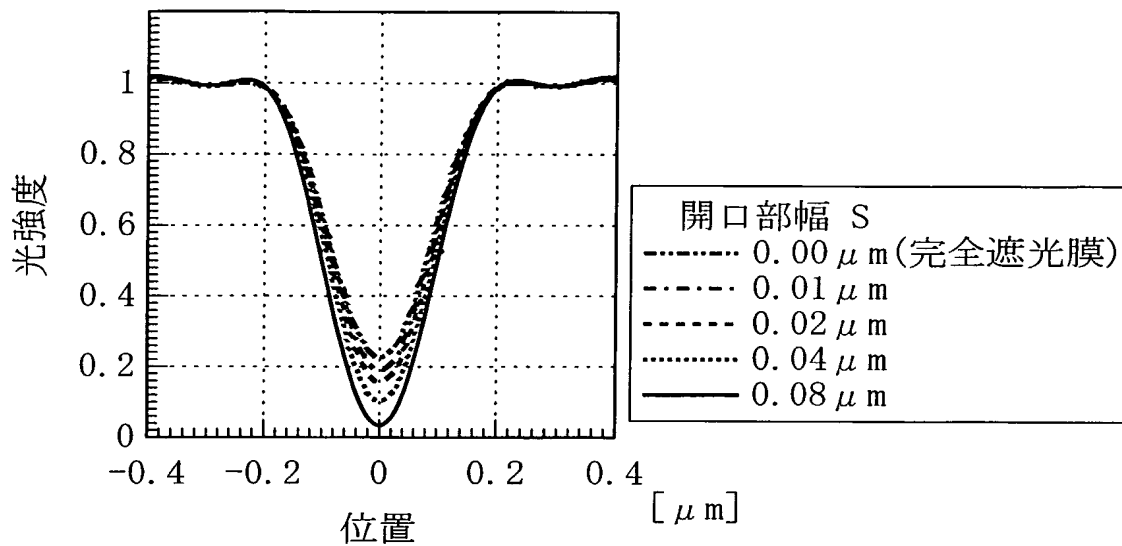


Fig. 19

(a)



(b)

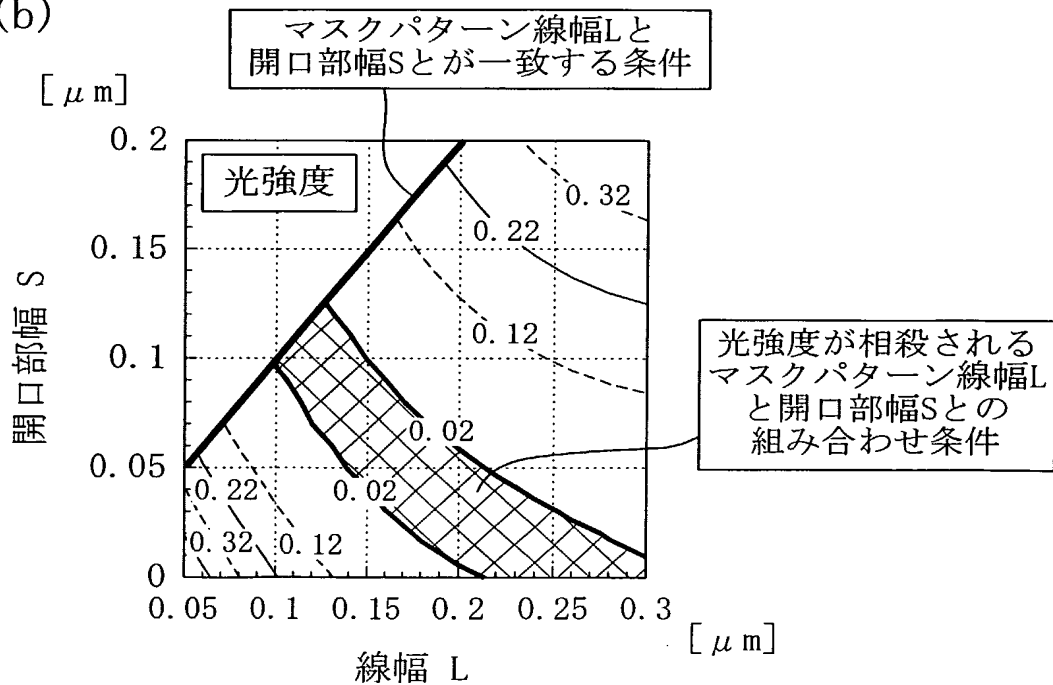


Fig. 20

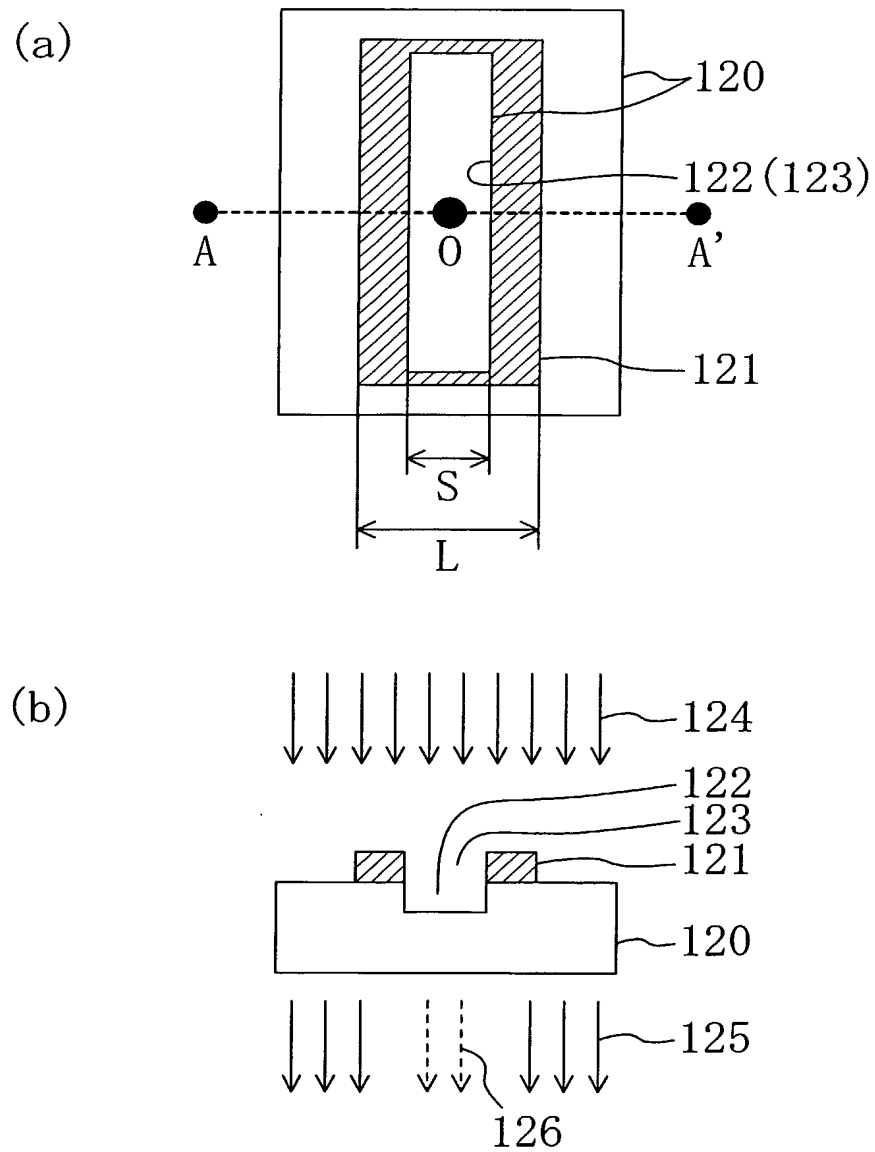


Fig. 21

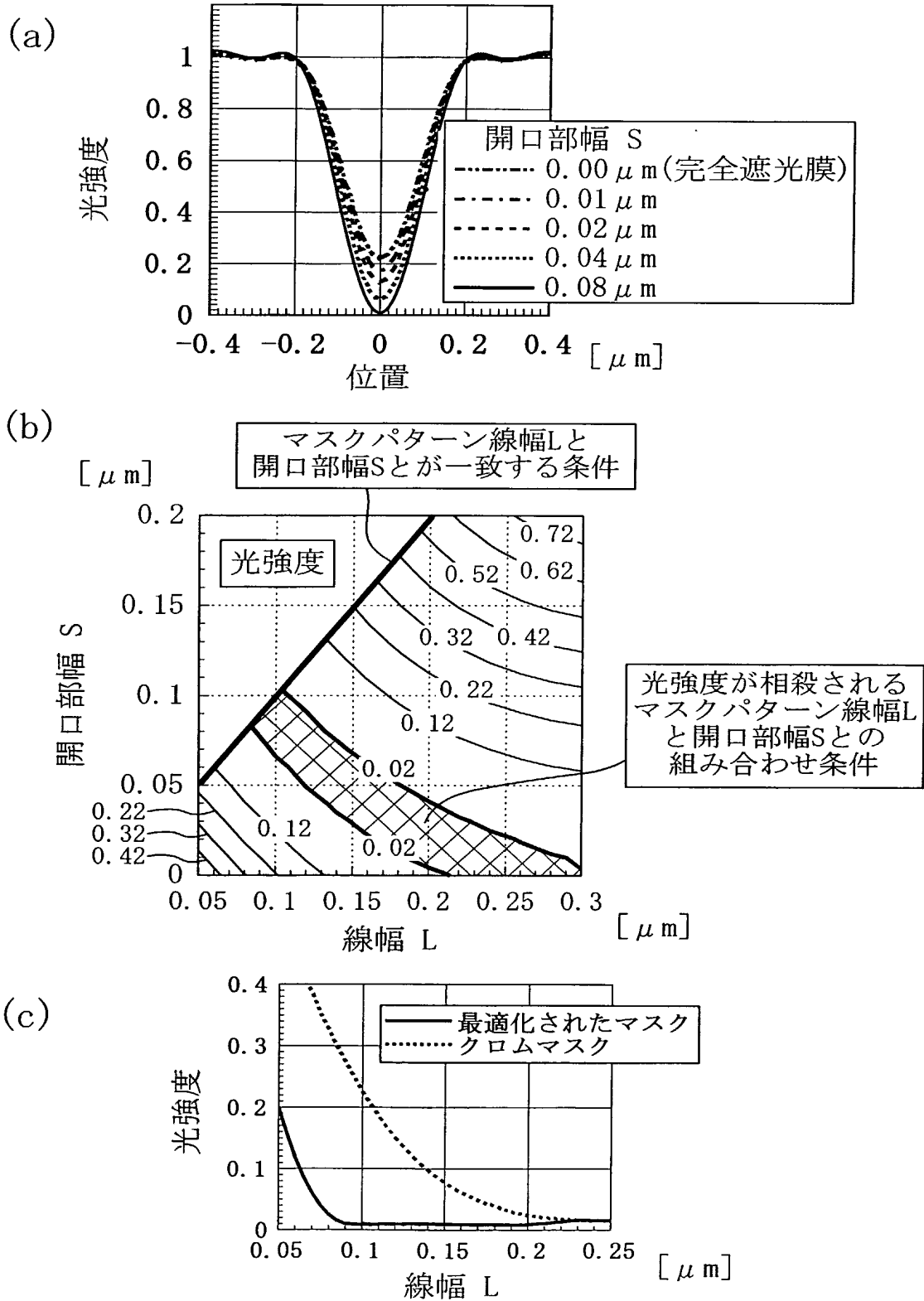


Fig. 22

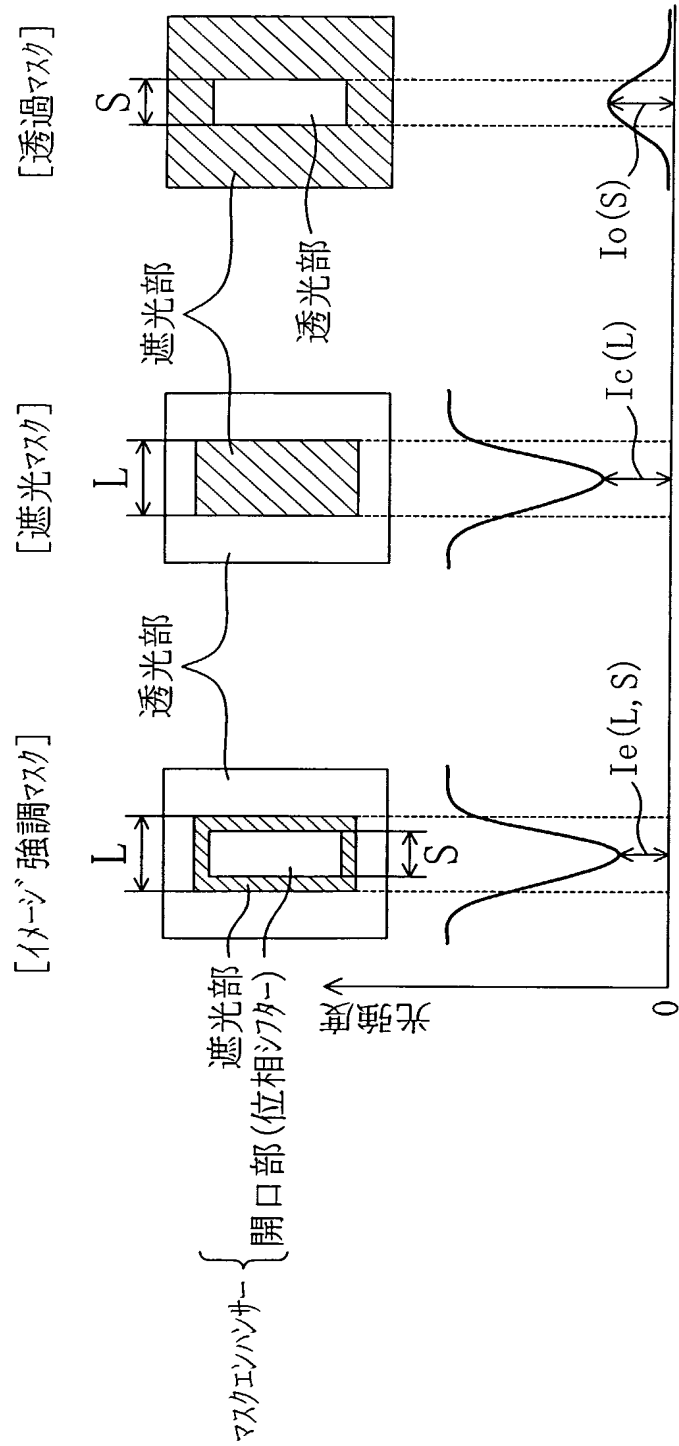
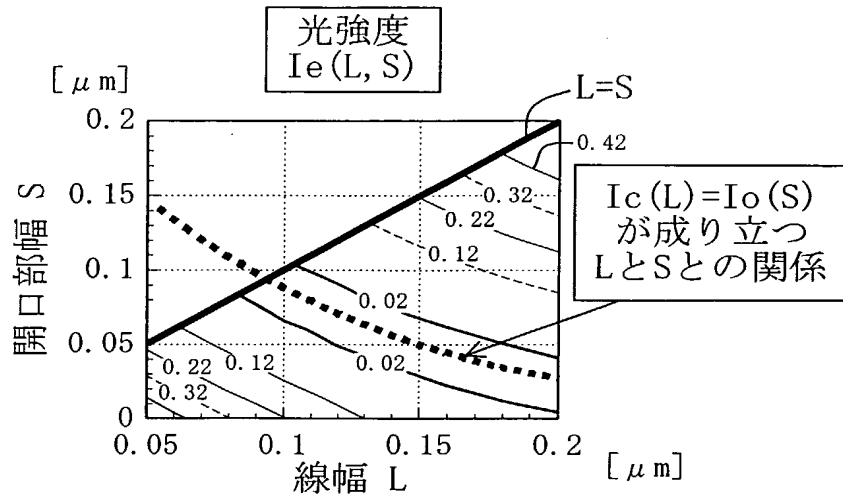
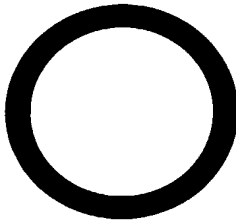
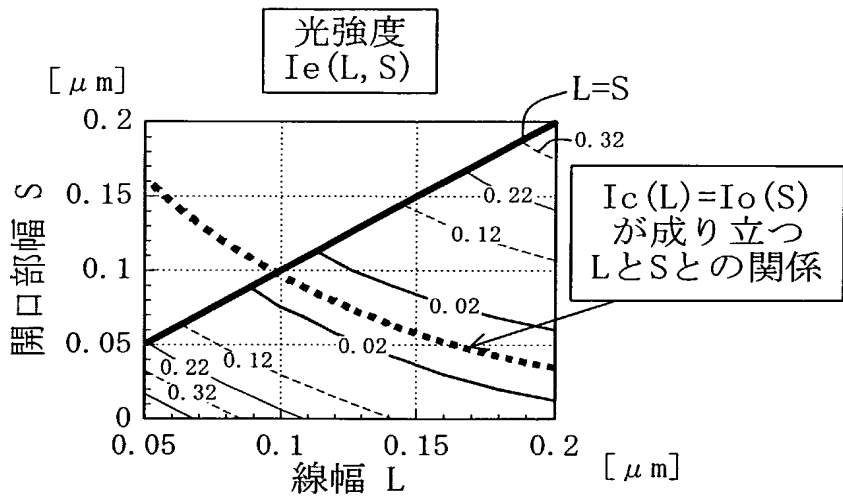
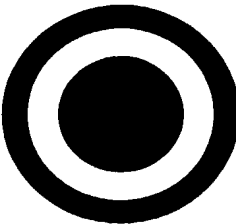


Fig. 23

(a)

通常露光
(光源形状)

(b)

輪帯露光
(光源形状)

(c)

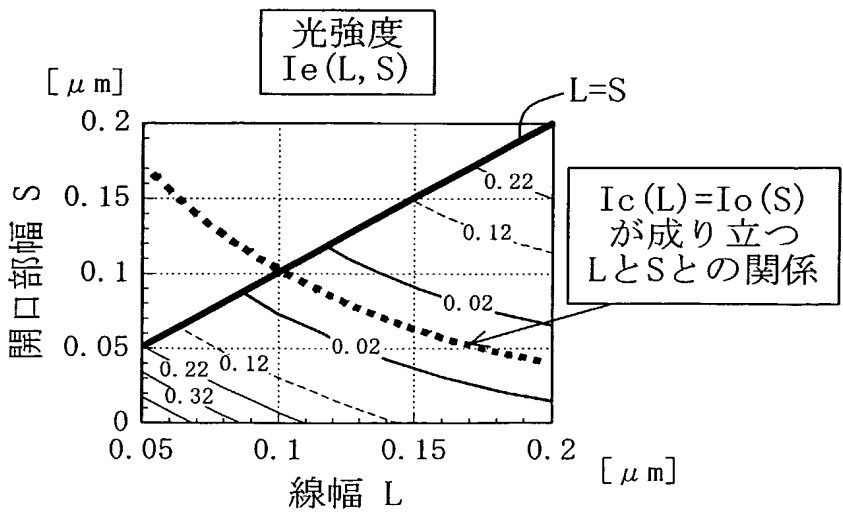
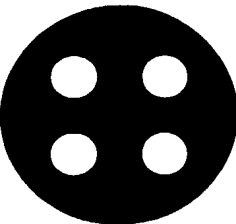
四重極露光
(光源形状)

Fig. 24

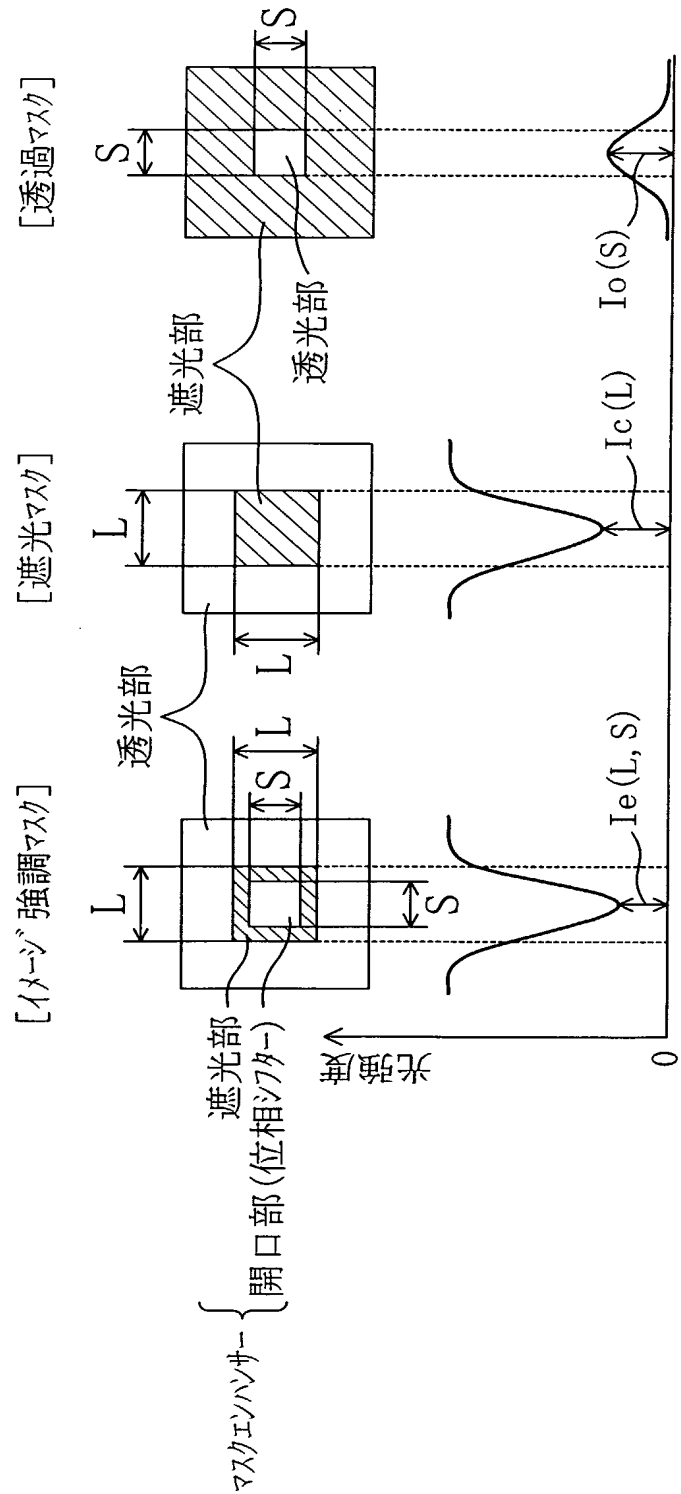
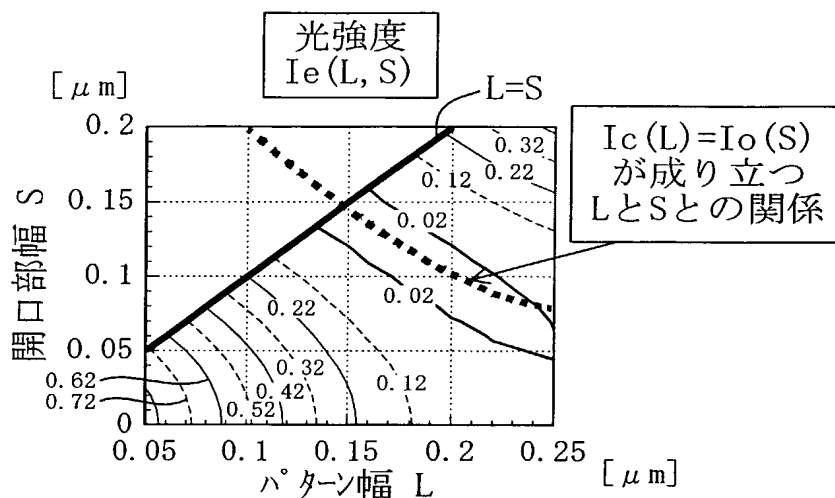
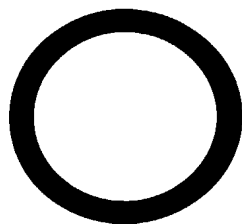
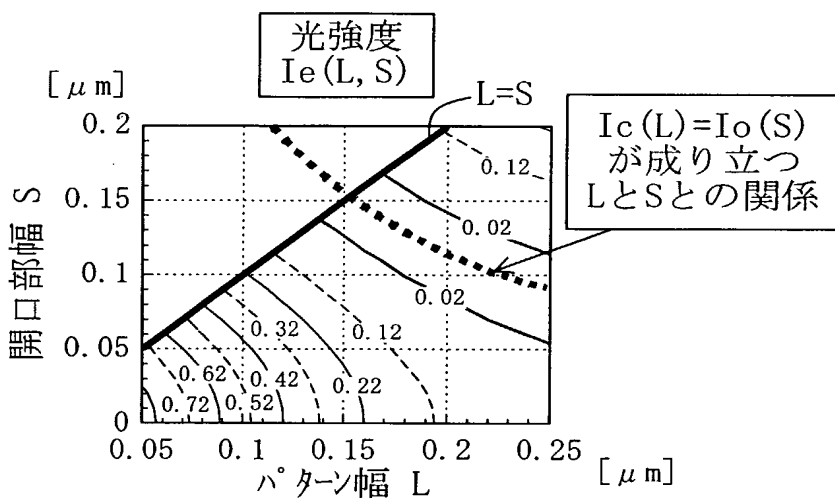
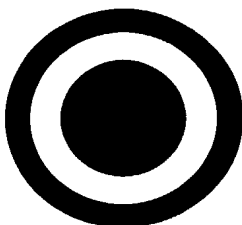


Fig. 25

(a)

通常露光
(光源形状)

(b)

輪帯露光
(光源形状)

(c)

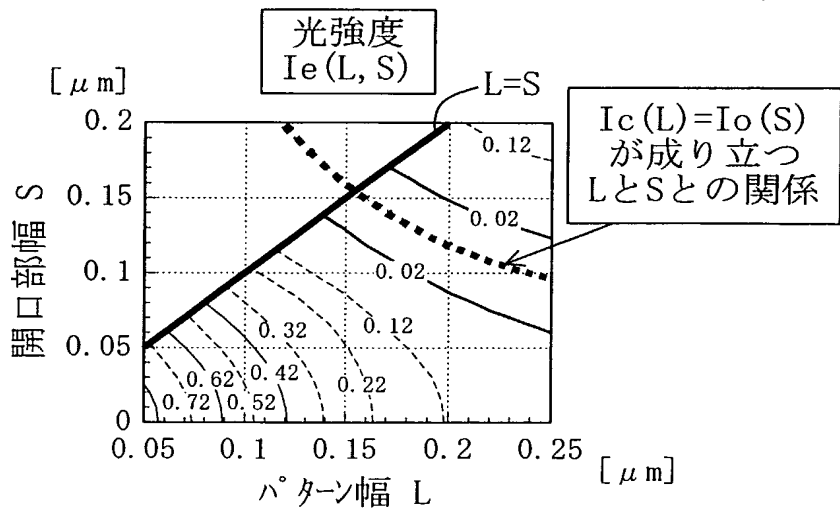
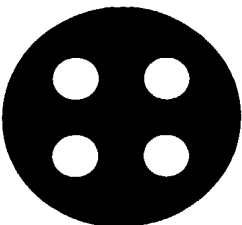
四重極露光
(光源形状)

Fig. 26

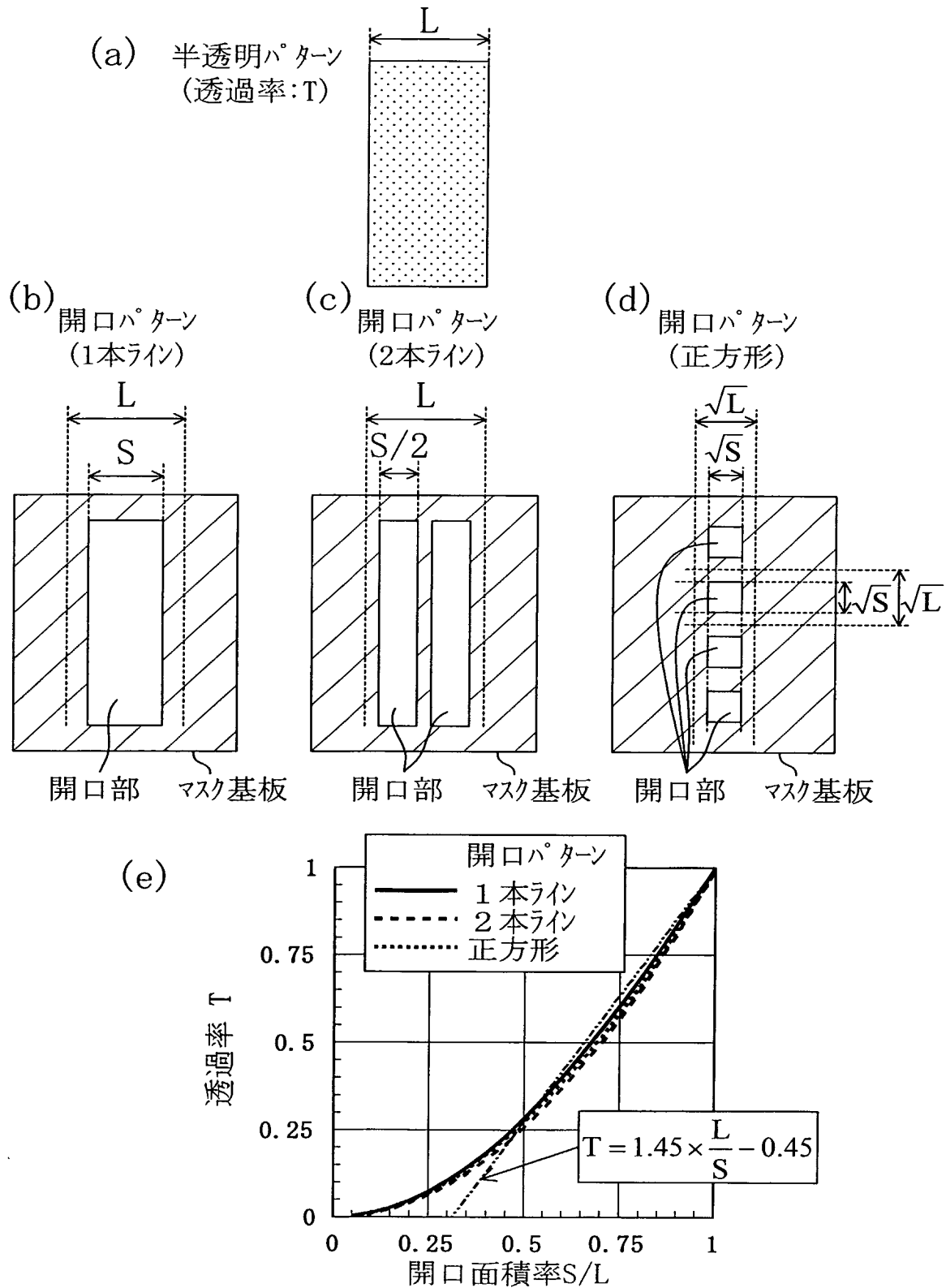


Fig. 27

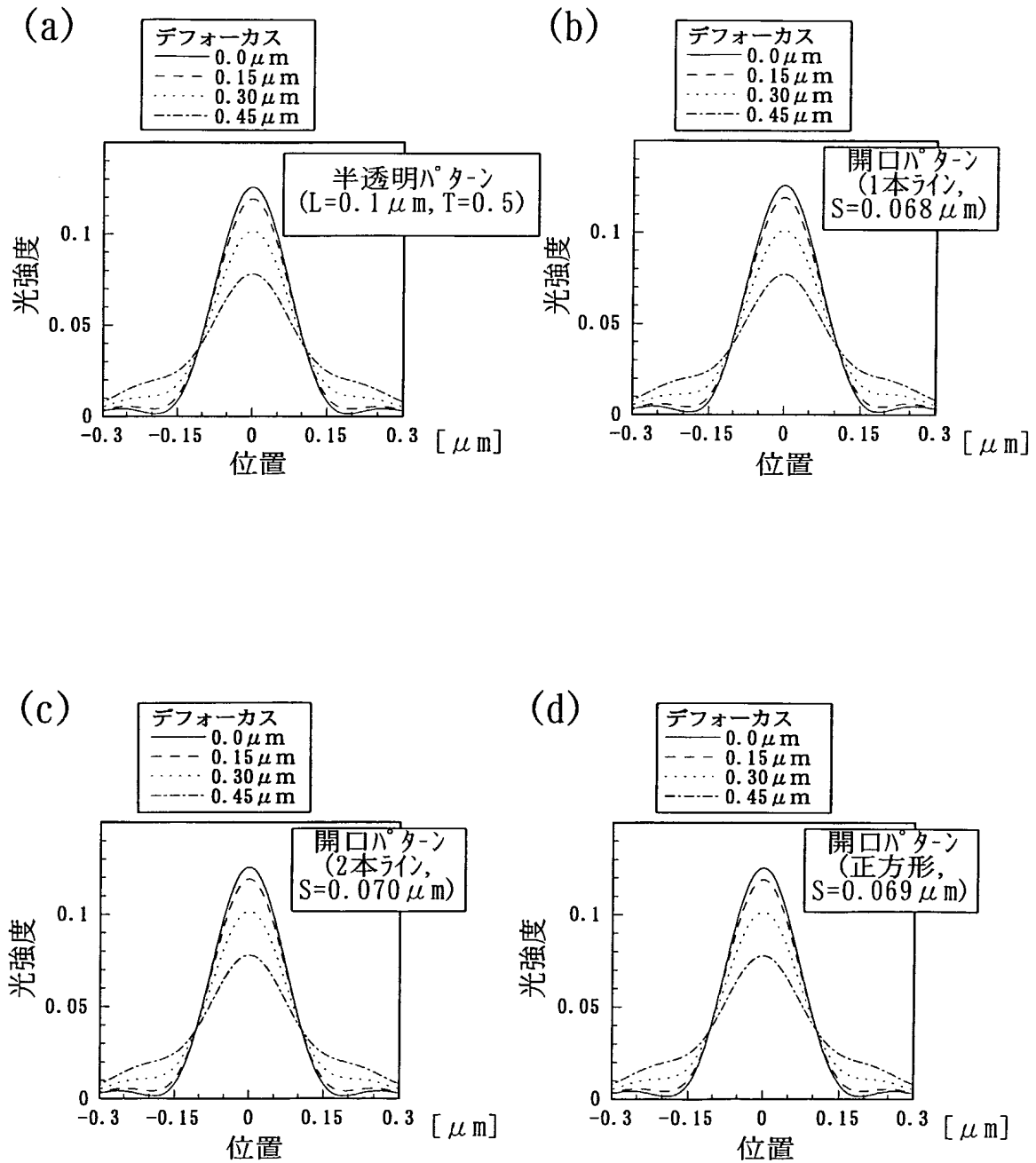


Fig. 28

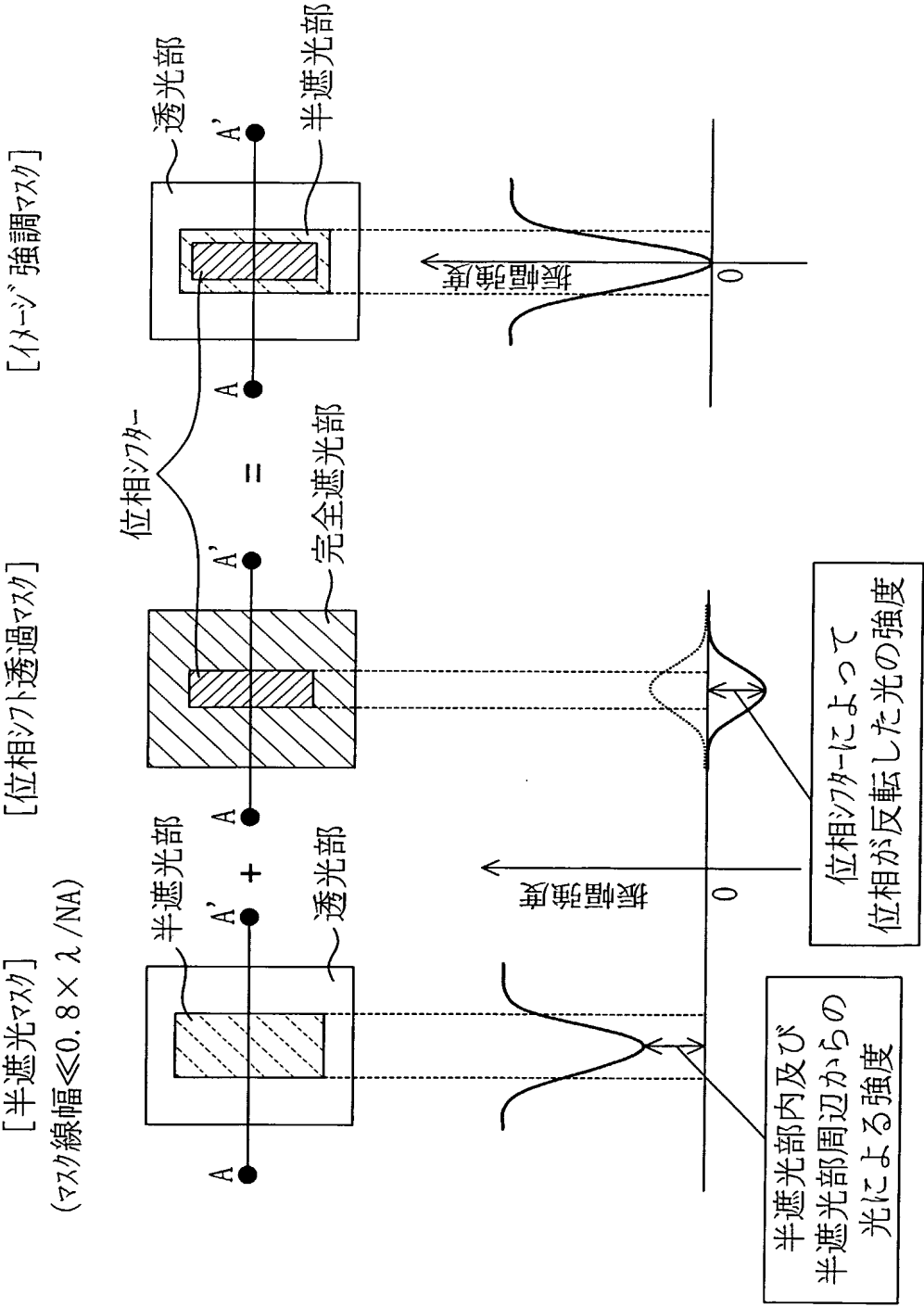


Fig. 29

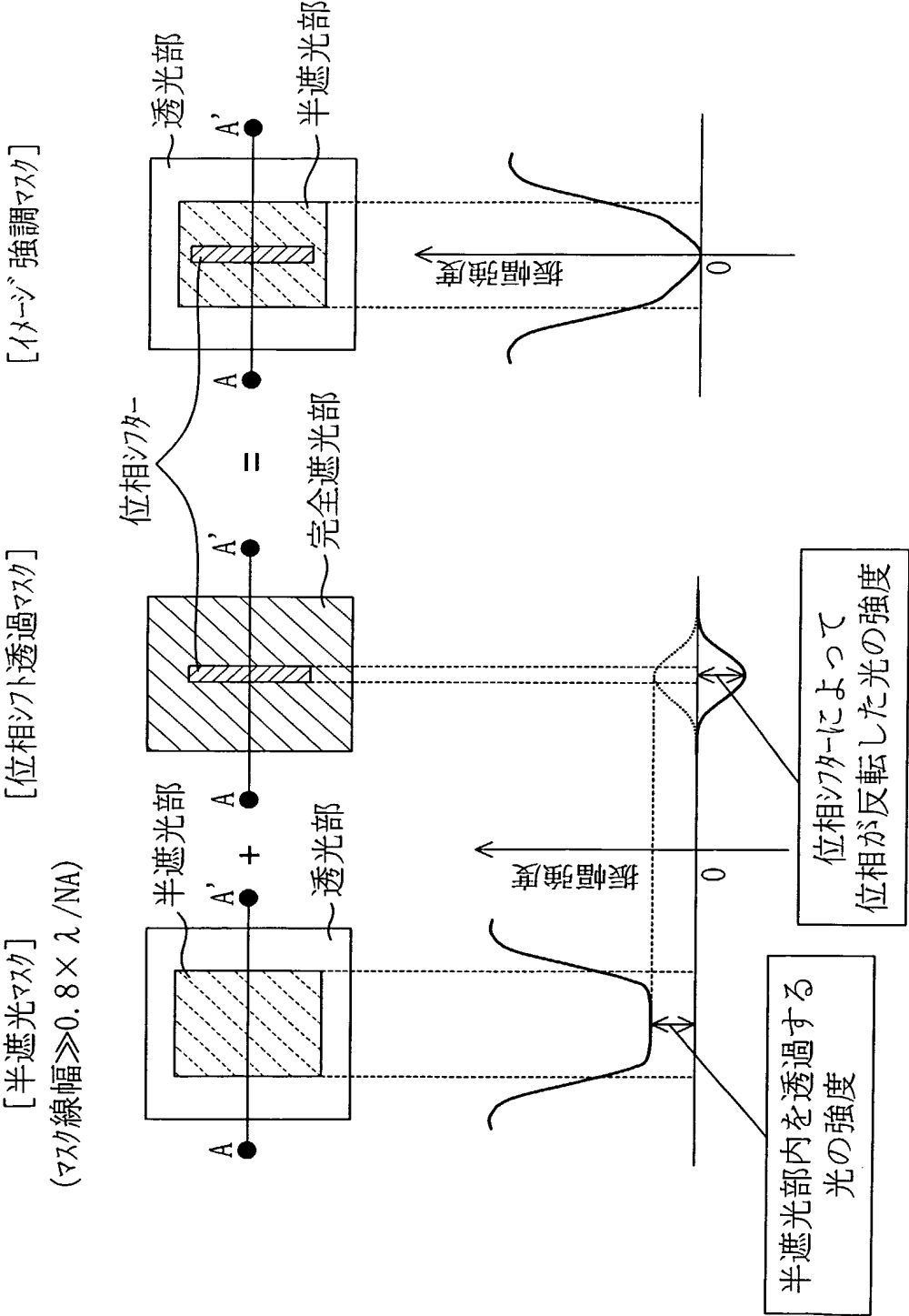
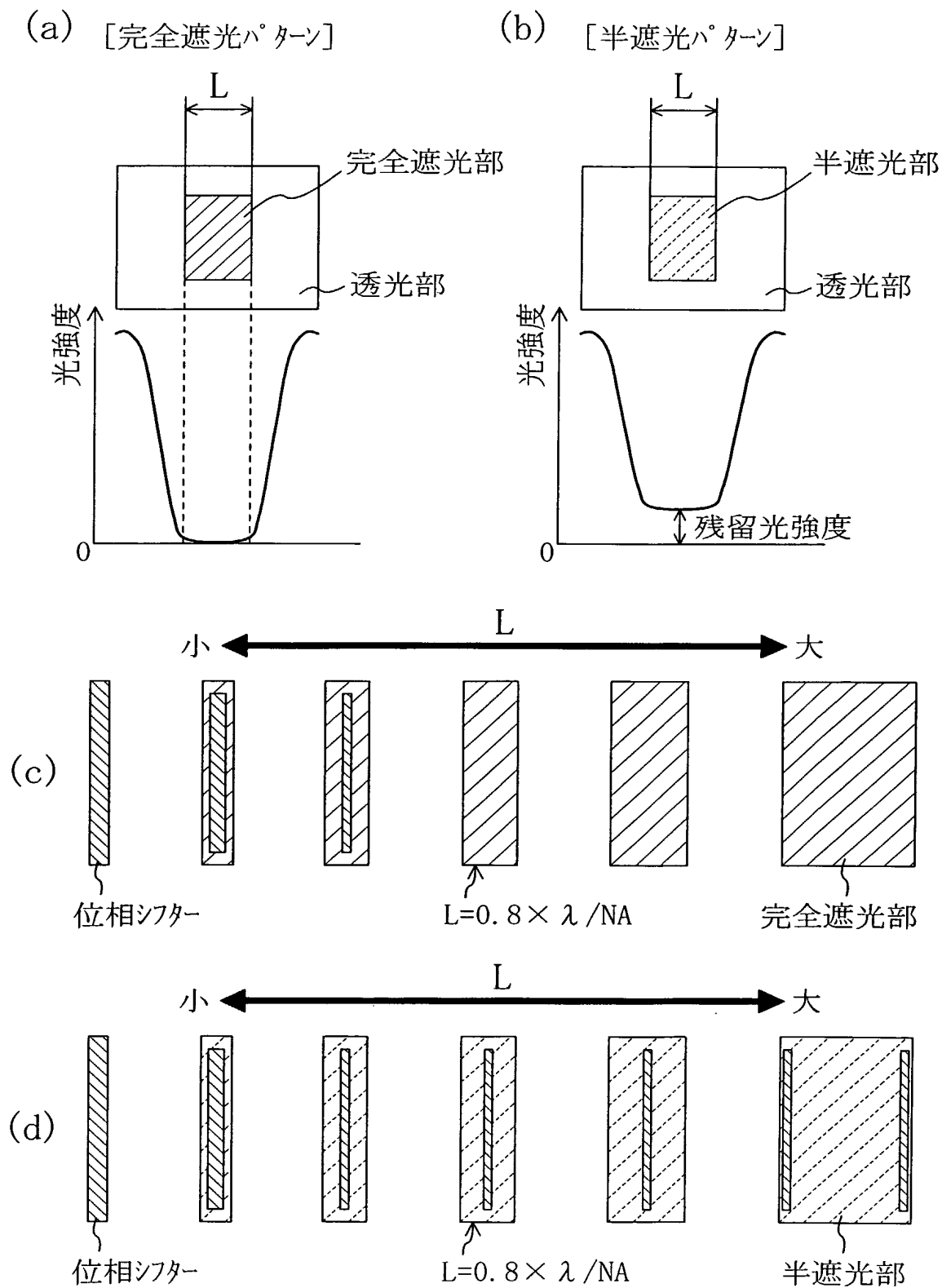


Fig. 30



30 / 56

Fig. 31

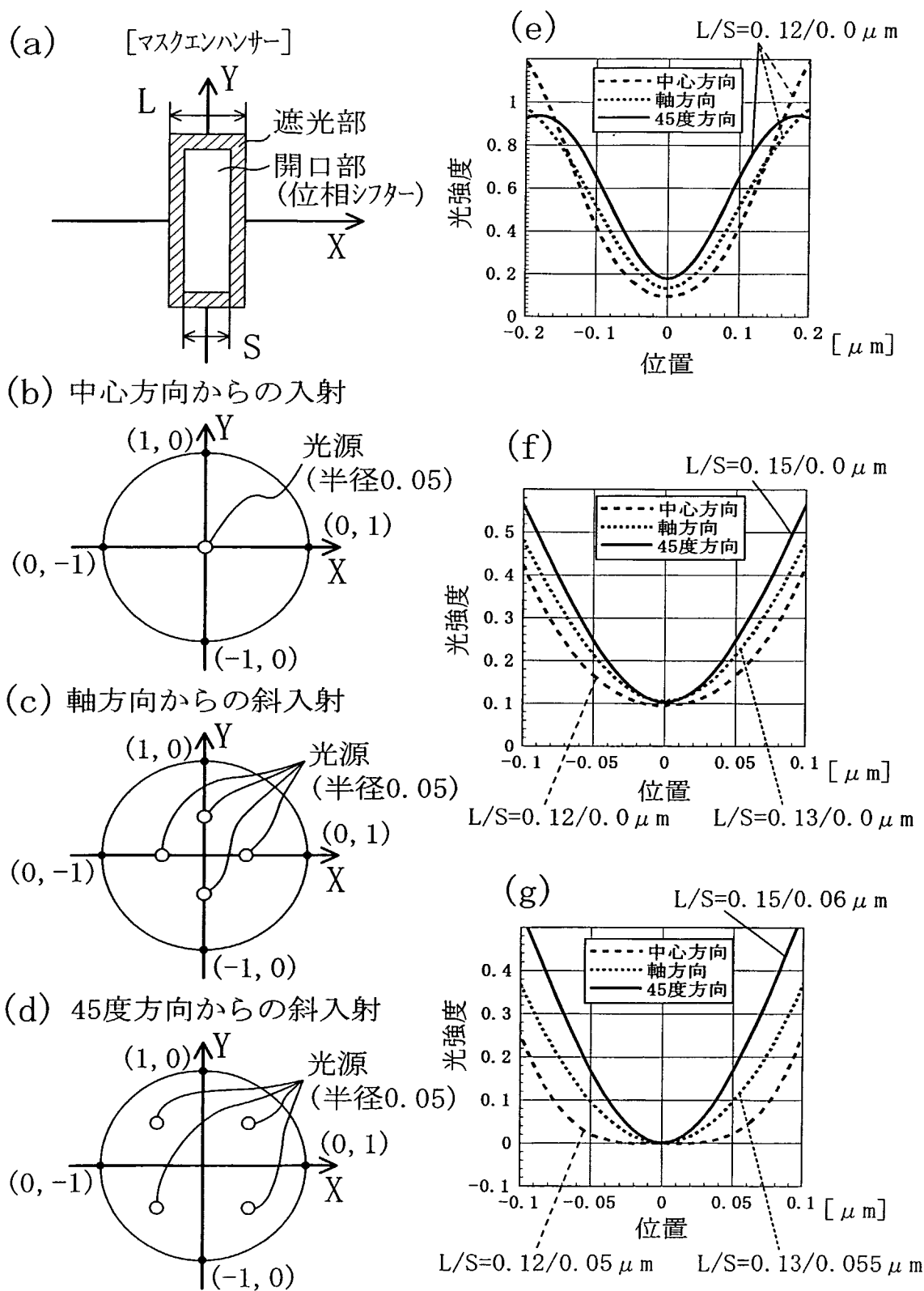


Fig. 32

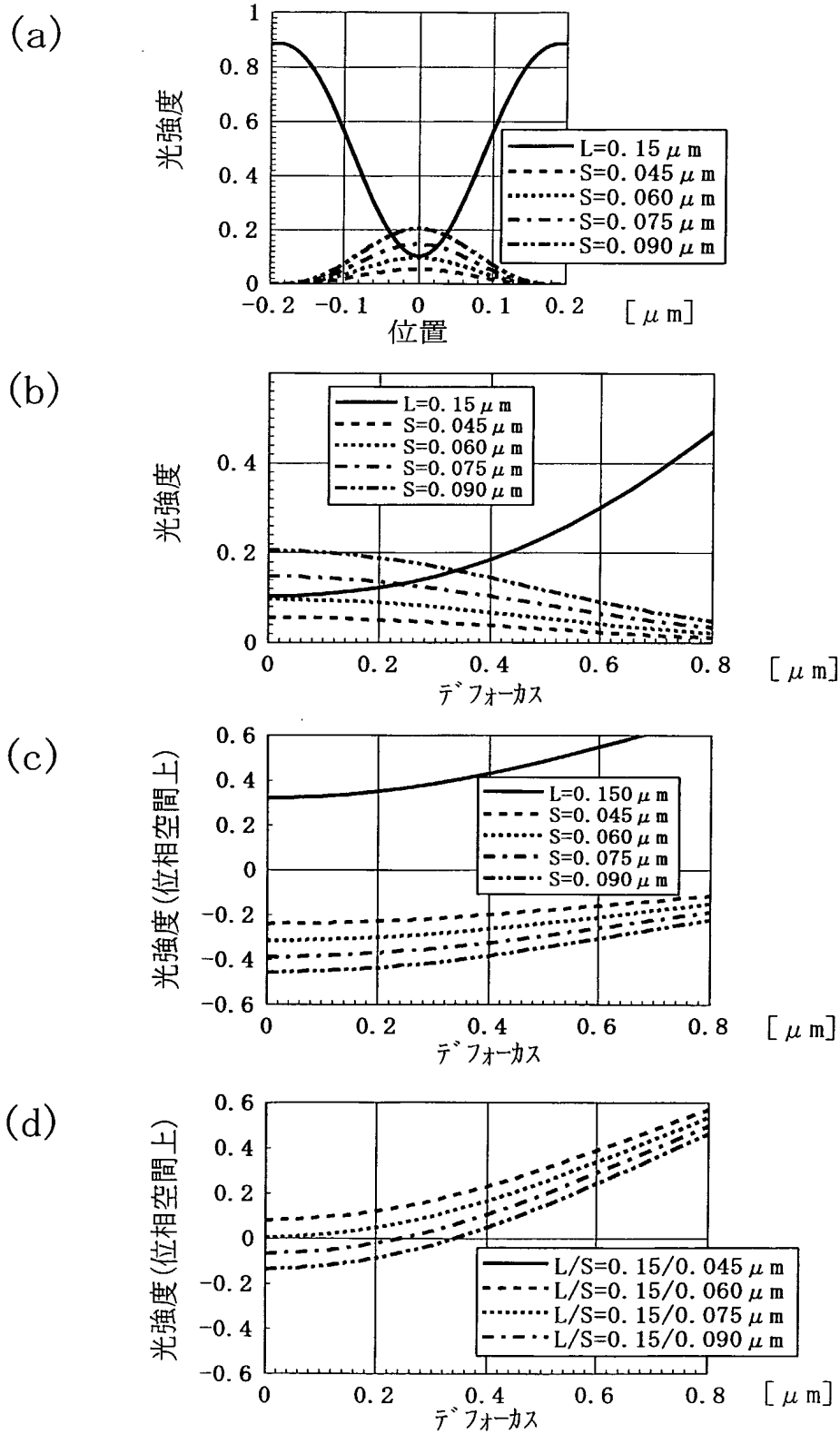


Fig. 33

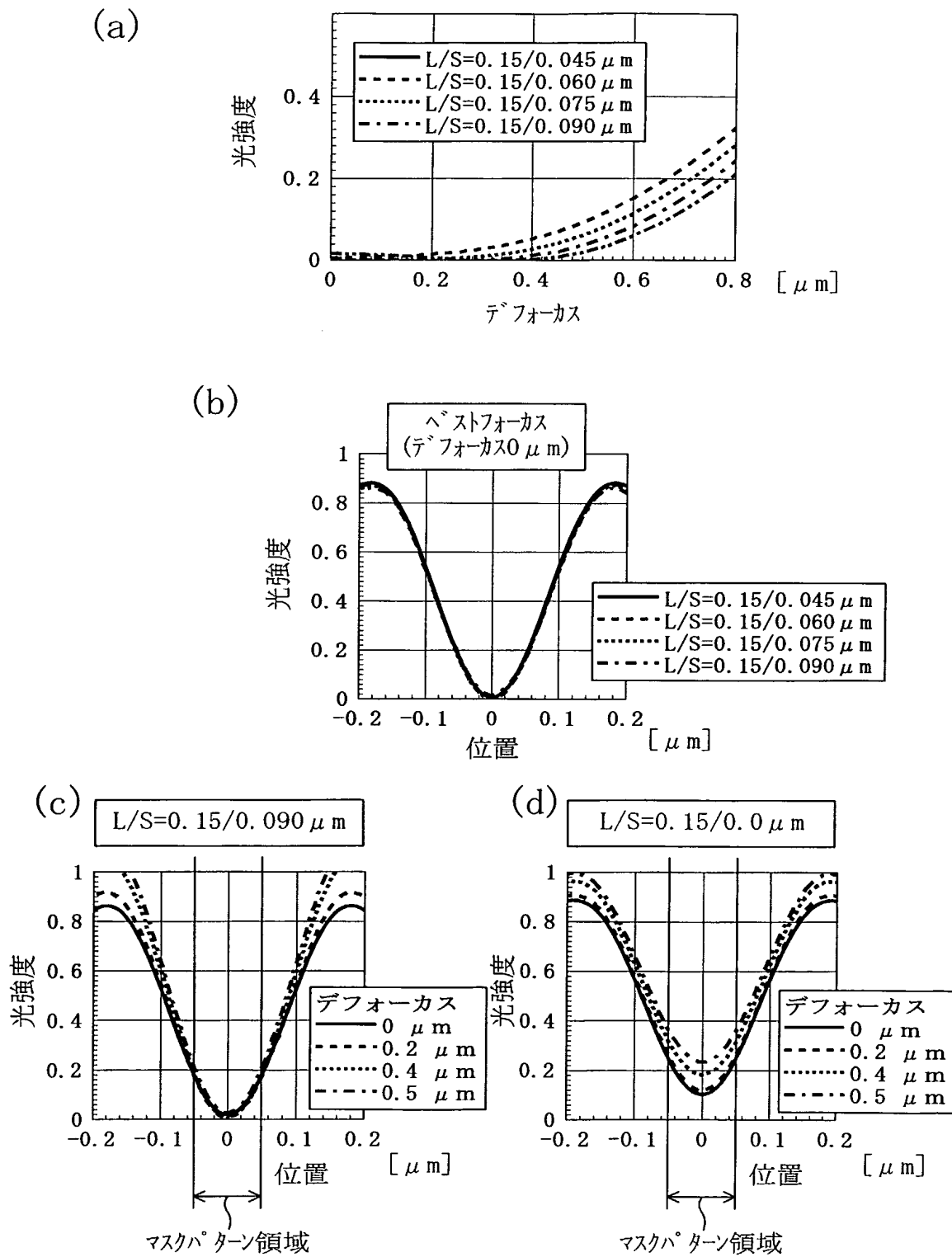
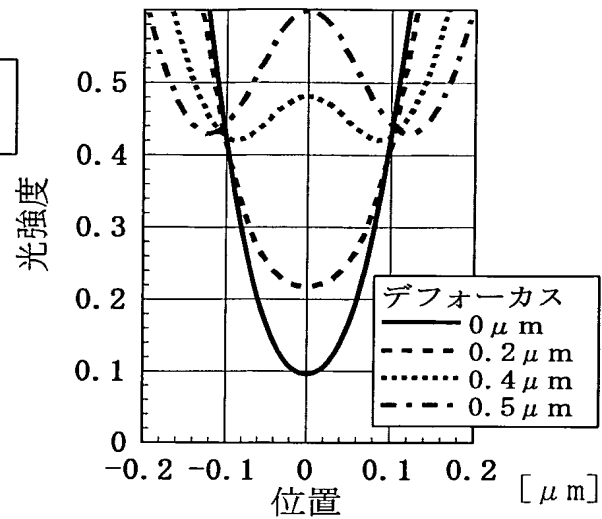


Fig. 34

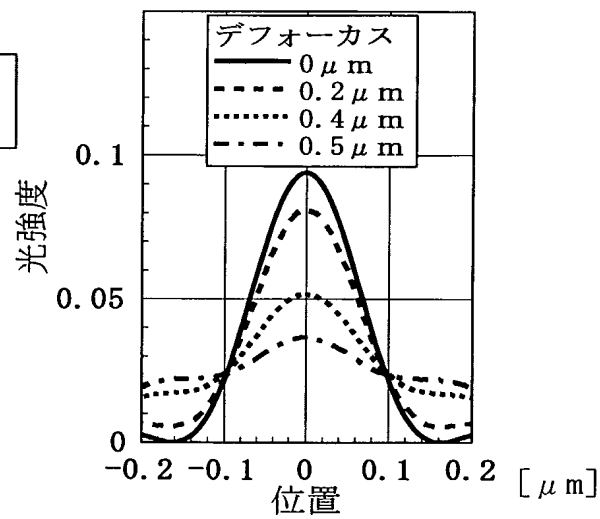
(a)

中心方向からの入射
幅 $0.12\ \mu\text{m}$ の遮光パターン



(b)

中心方向からの入射
幅 $0.05\ \mu\text{m}$ の開口パターン



(c)

中心方向からの入射
 $L/S=0.12/0.05\ \mu\text{m}$ の
マスクエンハンサー

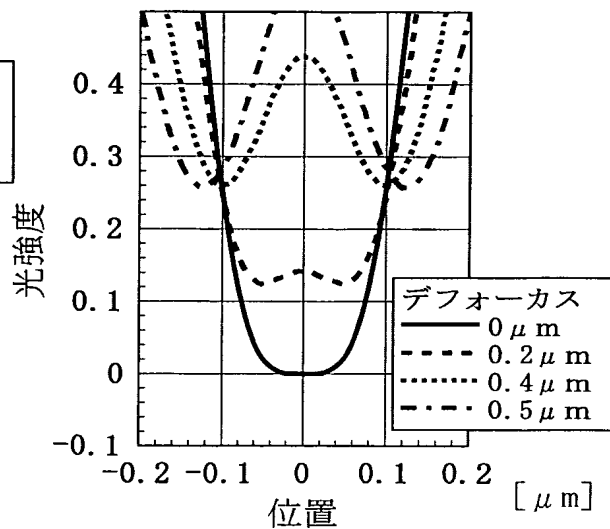
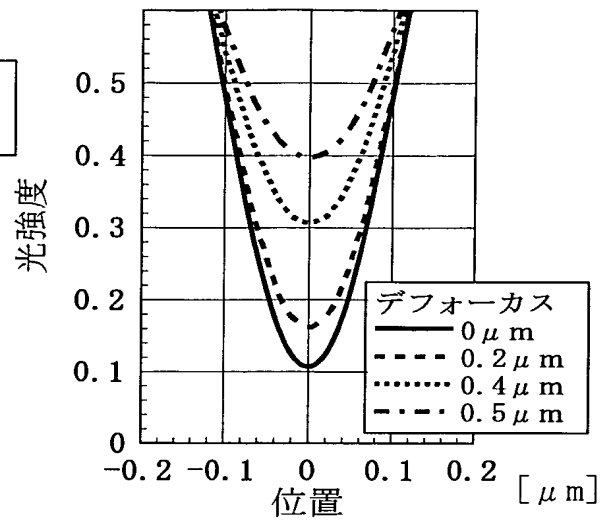


Fig. 35

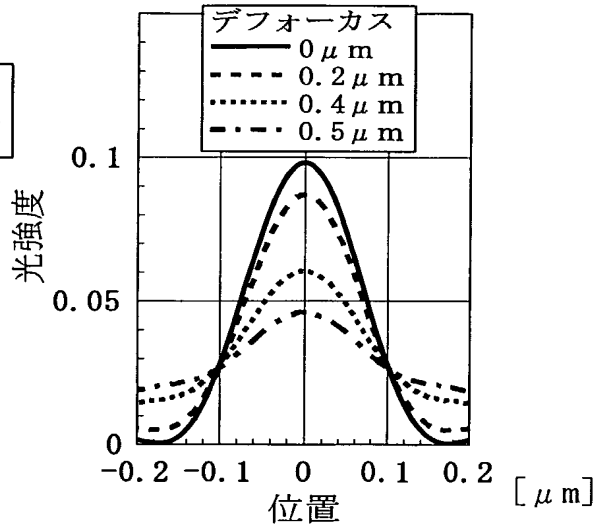
(a)

軸方向からの斜入射
幅 $0.13\text{ }\mu\text{m}$ の遮光パターン



(b)

軸方向からの斜入射
幅 $0.055\text{ }\mu\text{m}$ の開孔パターン



(c)

軸方向からの斜入射
 $L/S=0.13/0.055\text{ }\mu\text{m}$ の
マスクエンハンサー

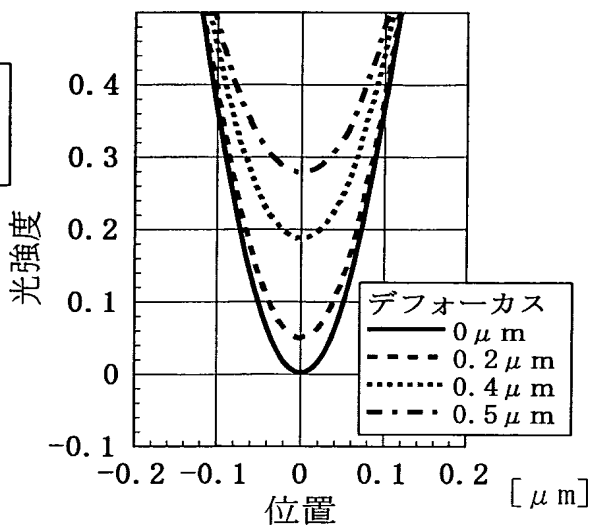
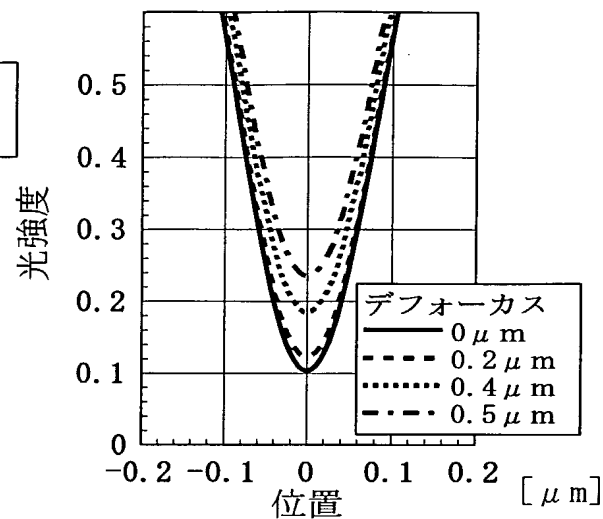


Fig. 36

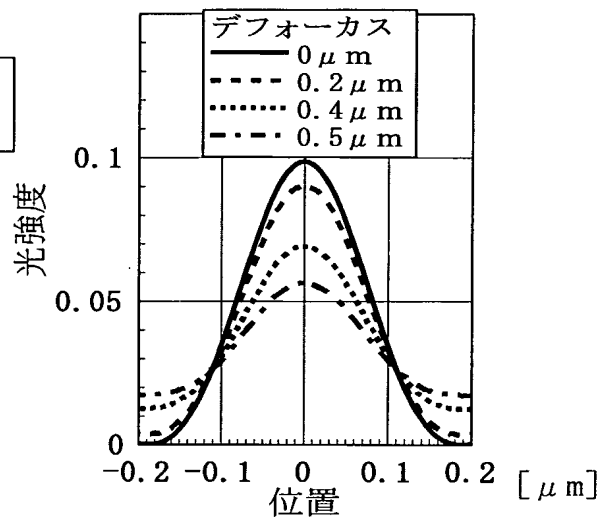
(a)

45度方向からの斜入射
幅 $0.15\text{ }\mu\text{m}$ の遮光パターン



(b)

45度方向からの斜入射
幅 $0.06\text{ }\mu\text{m}$ の開孔パターン



(c)

45度方向からの斜入射
 $L/S=0.15/0.06\text{ }\mu\text{m}$ の
マスクエンハンサー

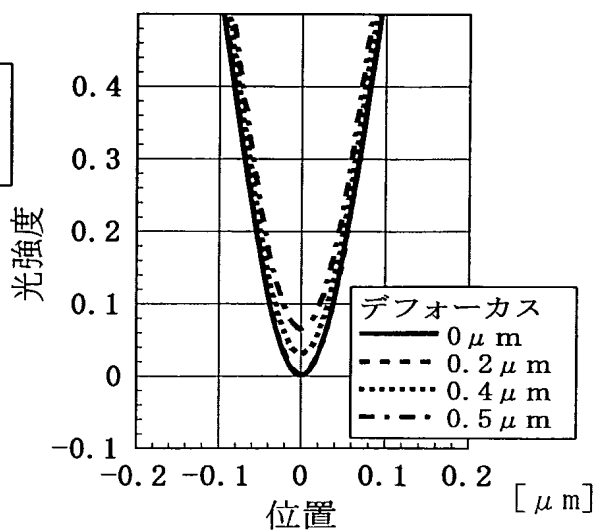


Fig. 37

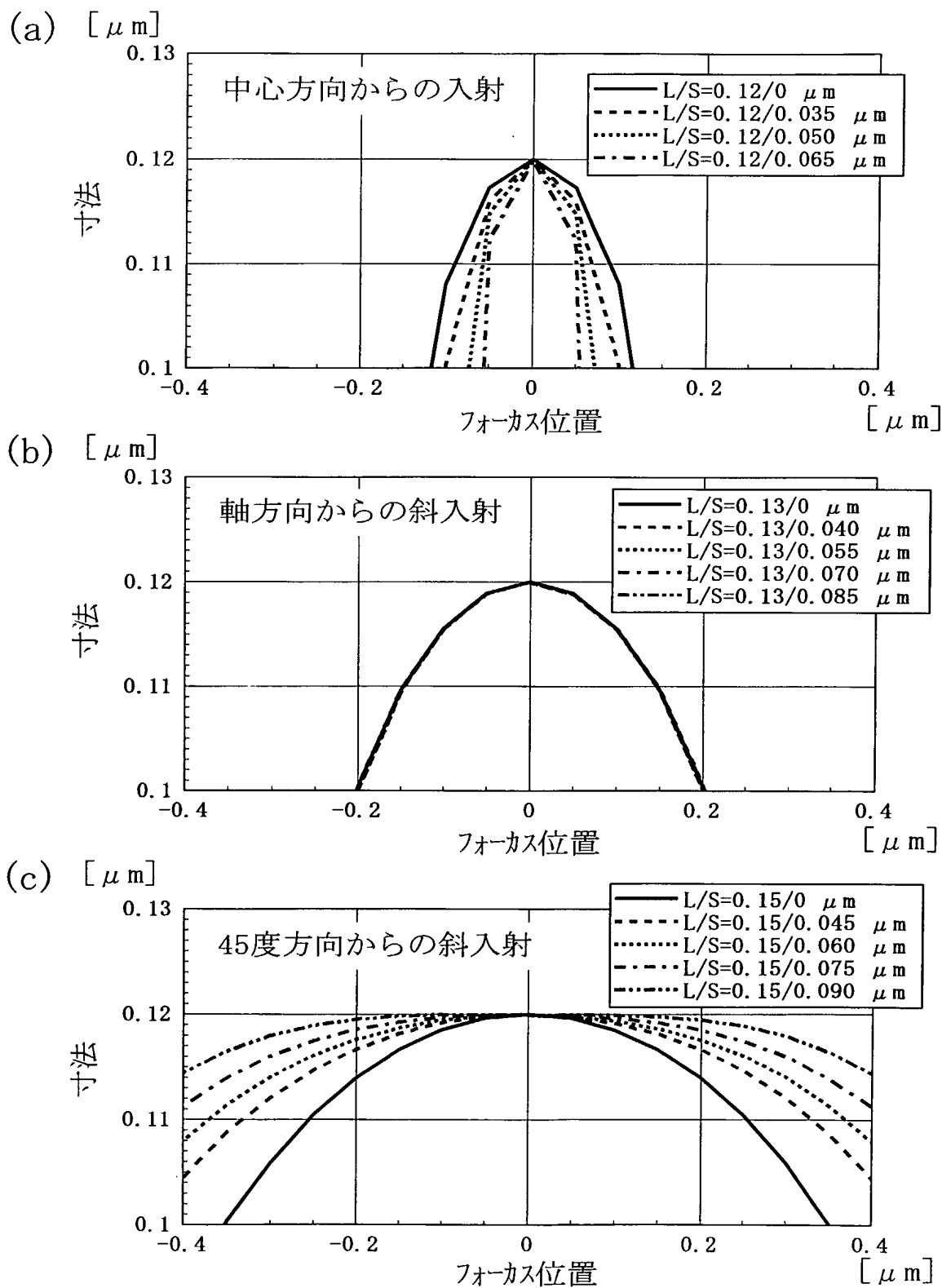


Fig. 38

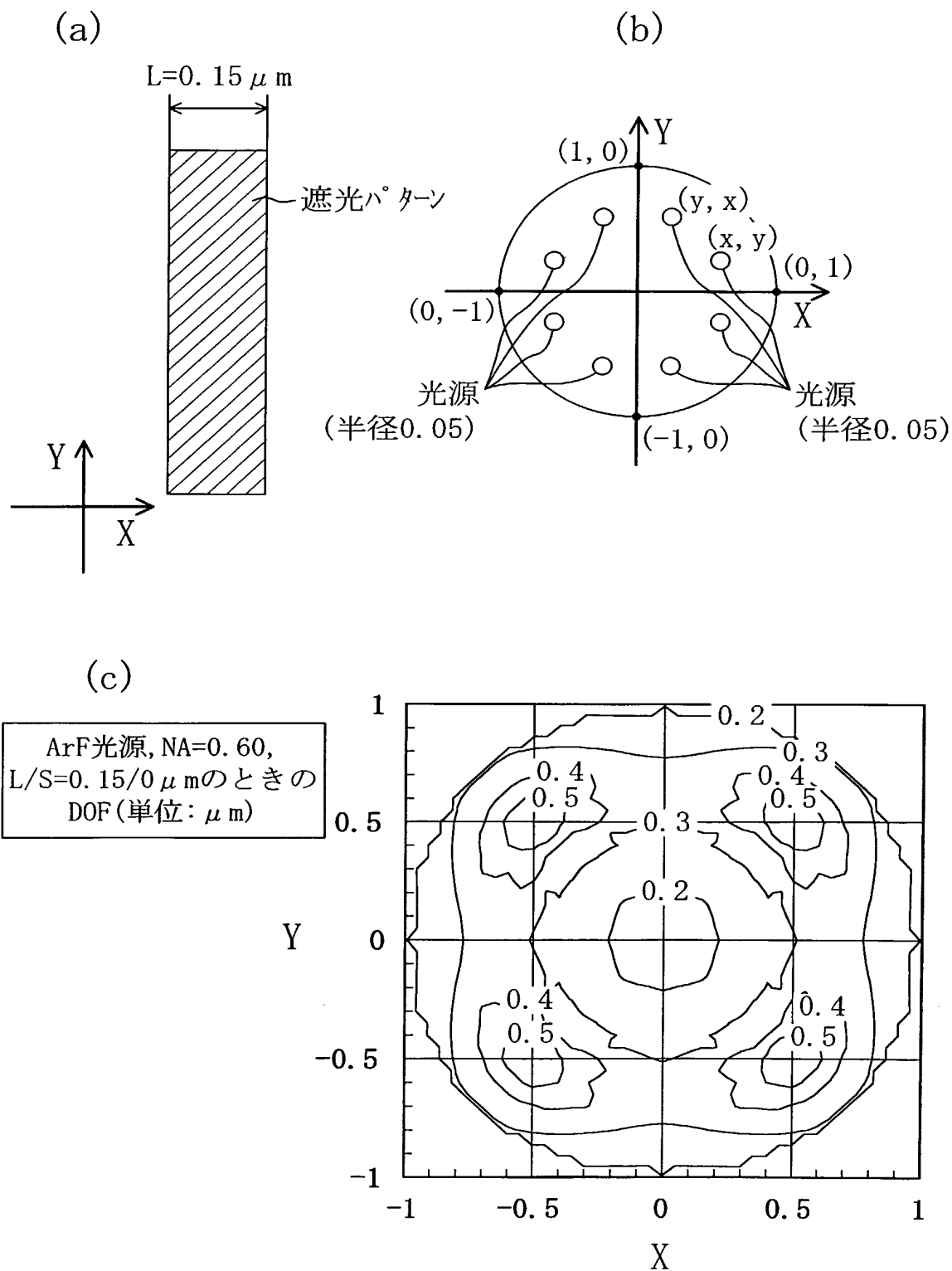


Fig. 39

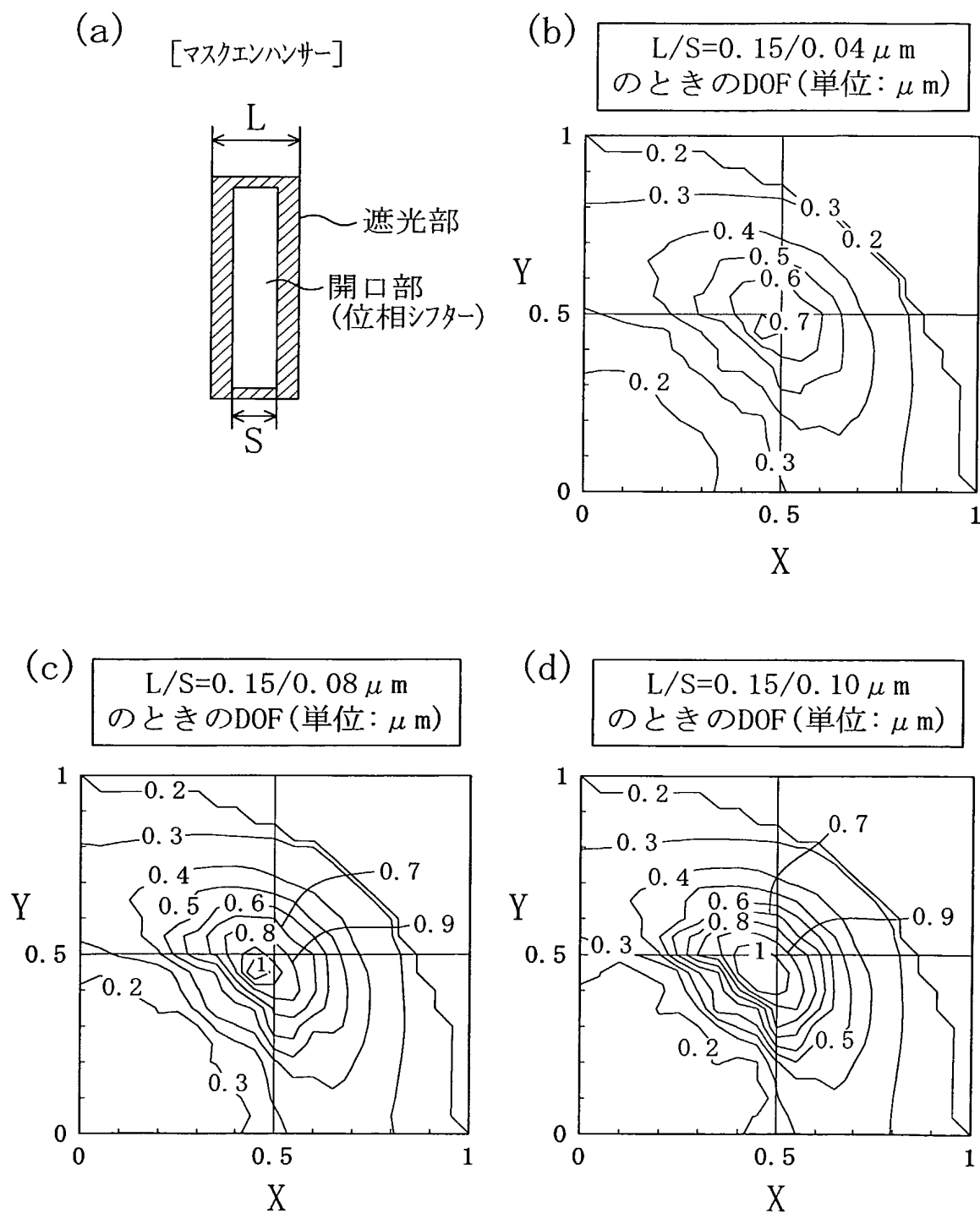


Fig. 40

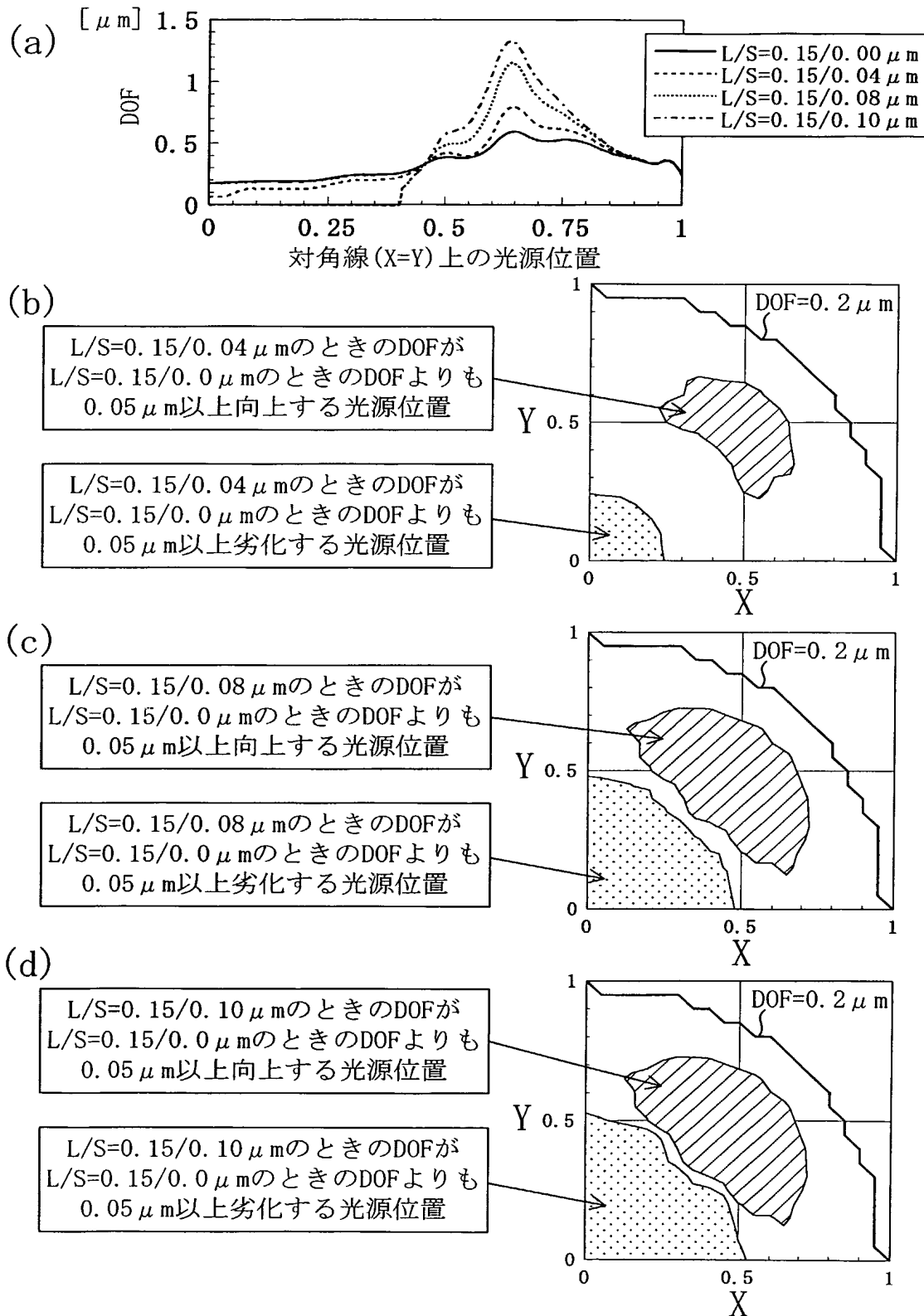


Fig. 41

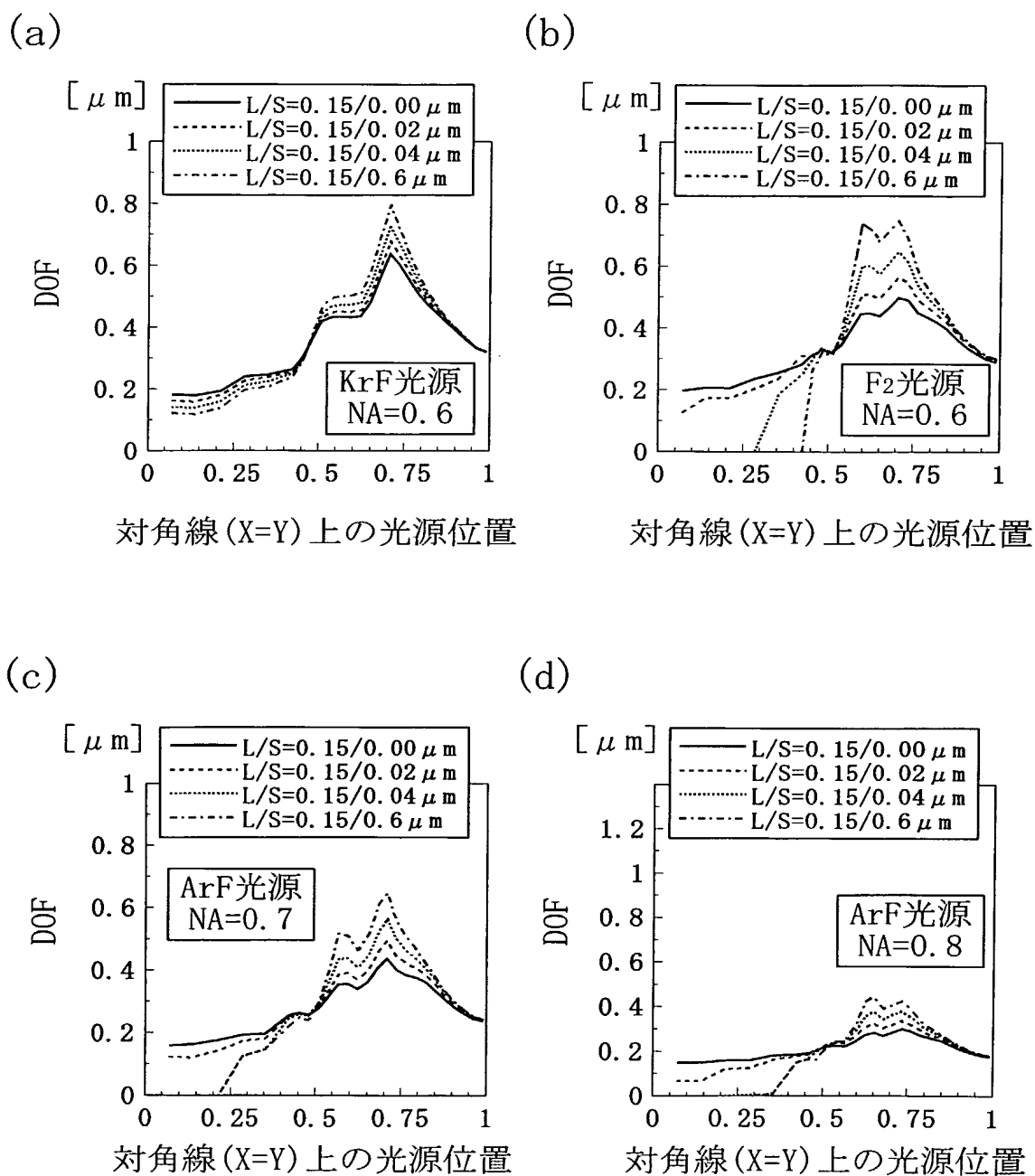


Fig. 42

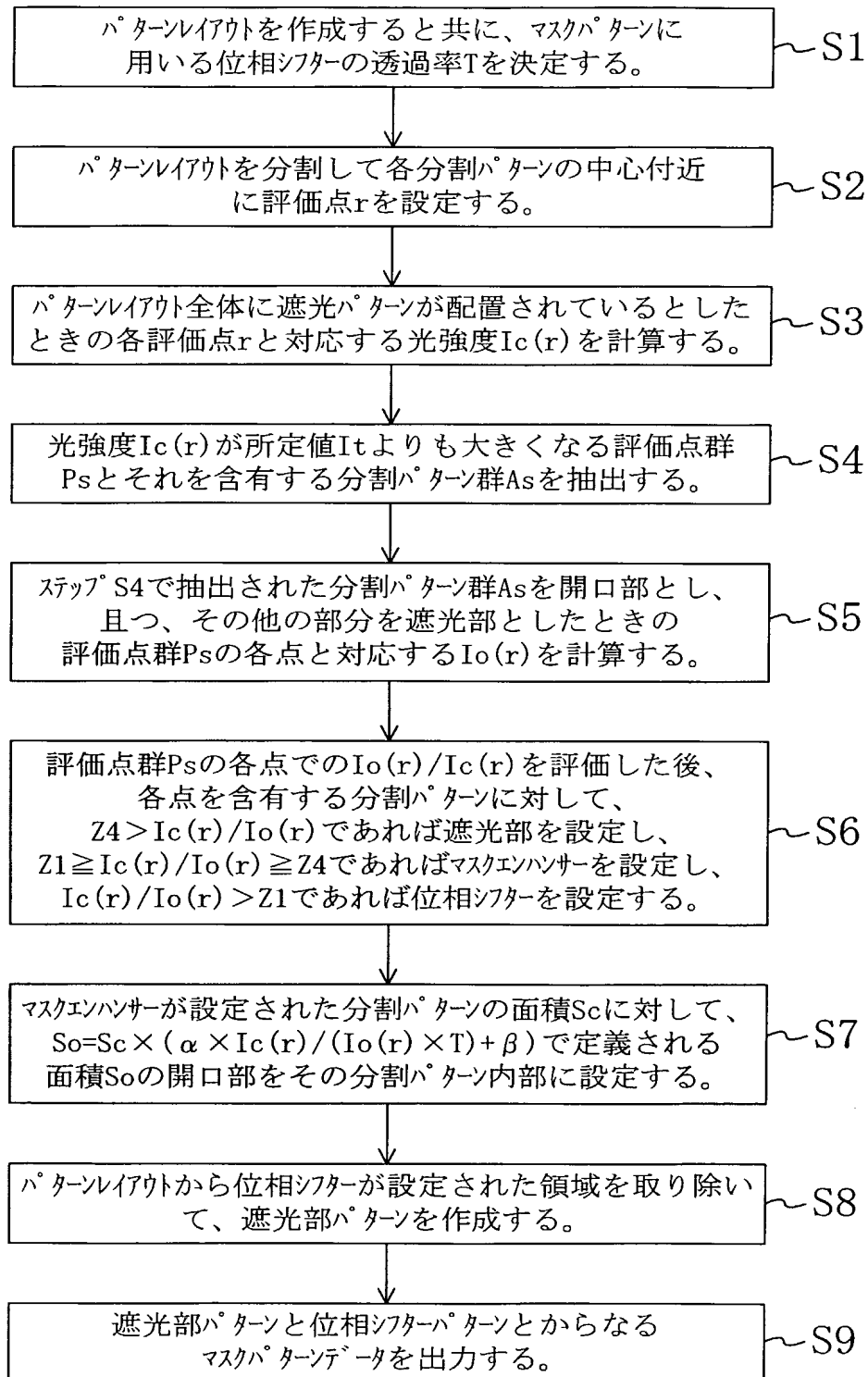


Fig. 43

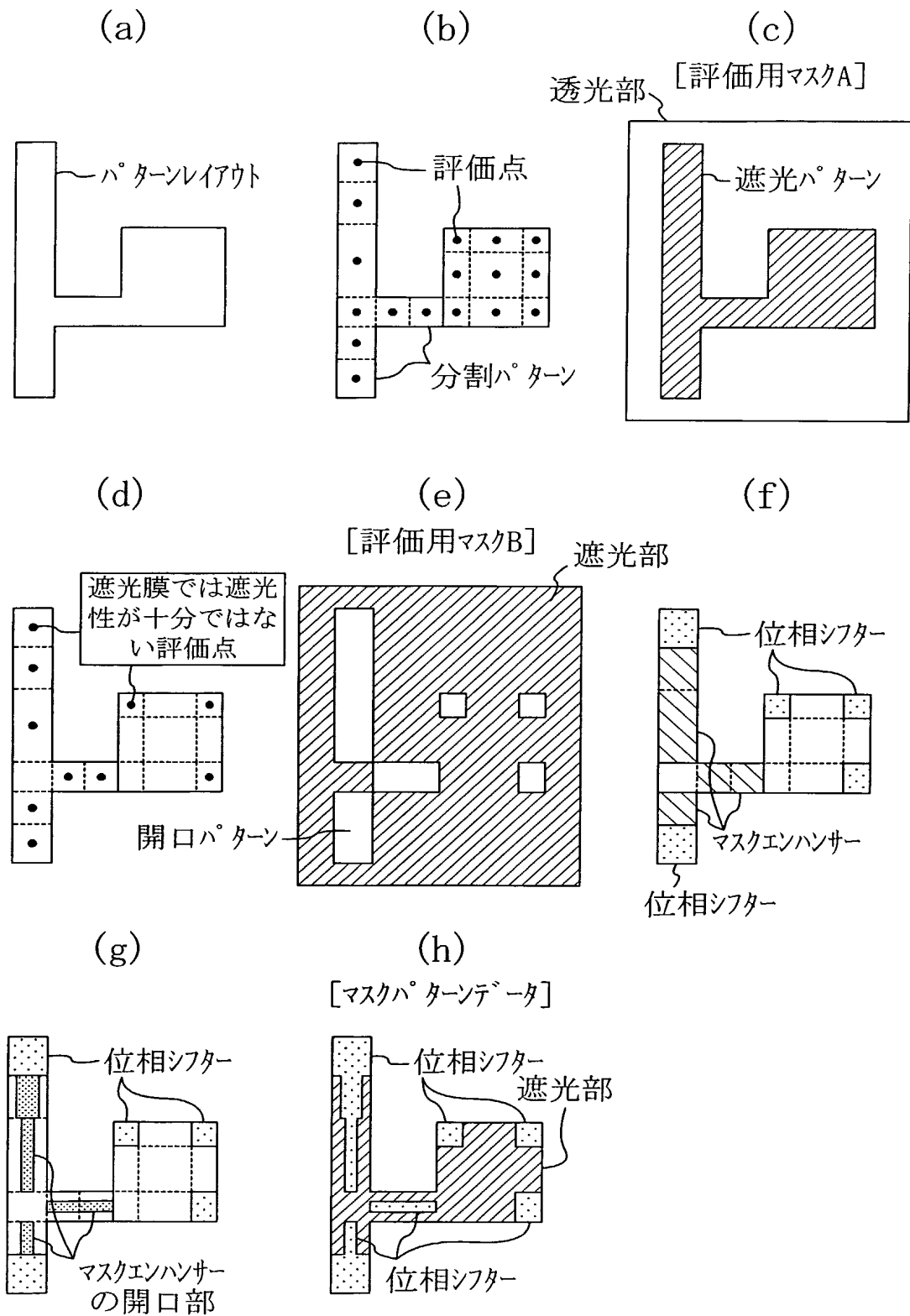
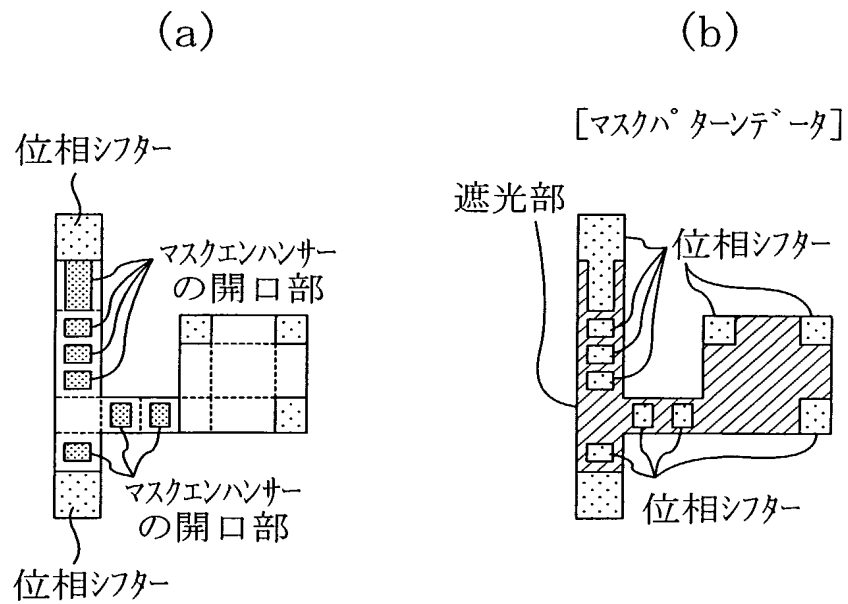
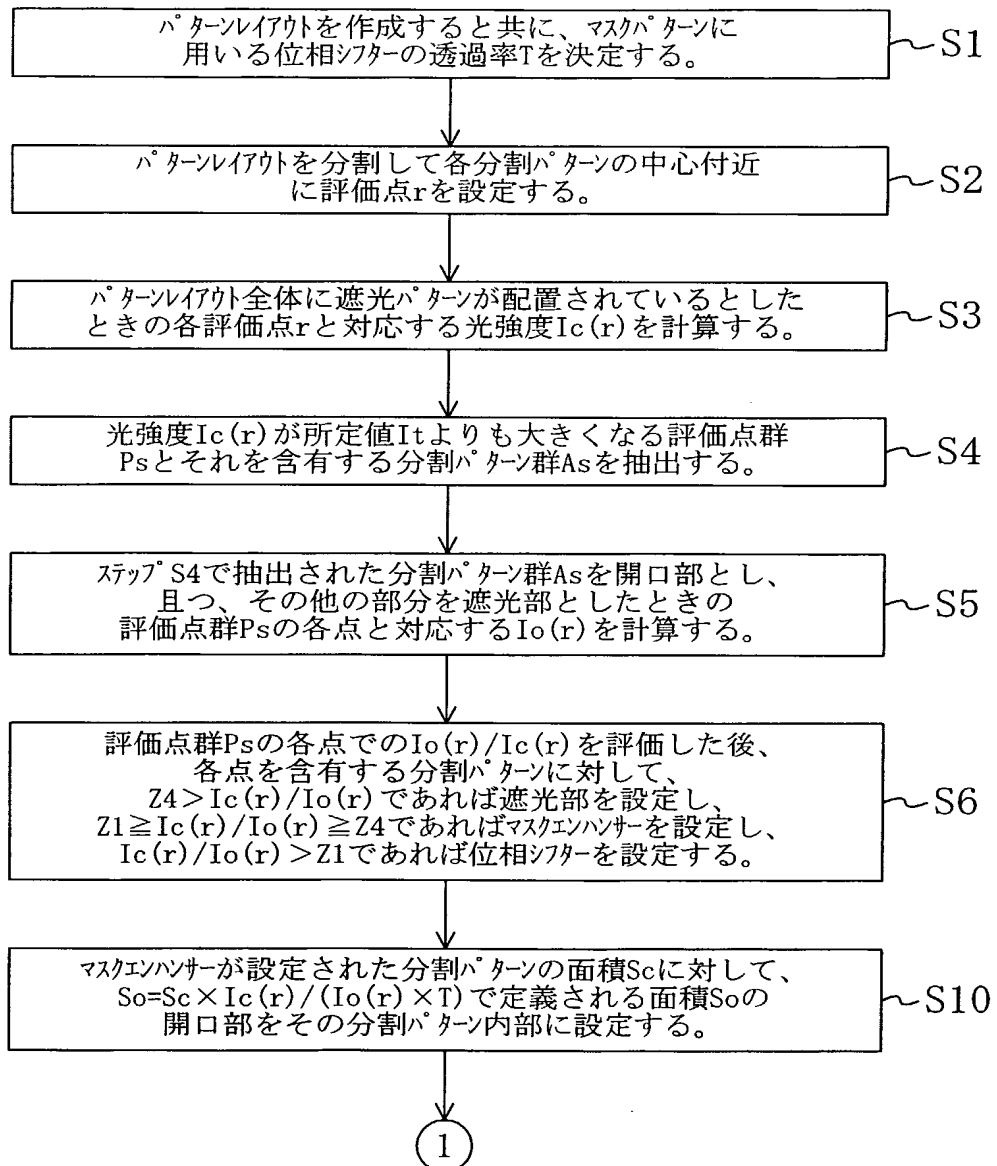


Fig. 44



44 / 56

Fig. 45



45 / 56

Fig. 46

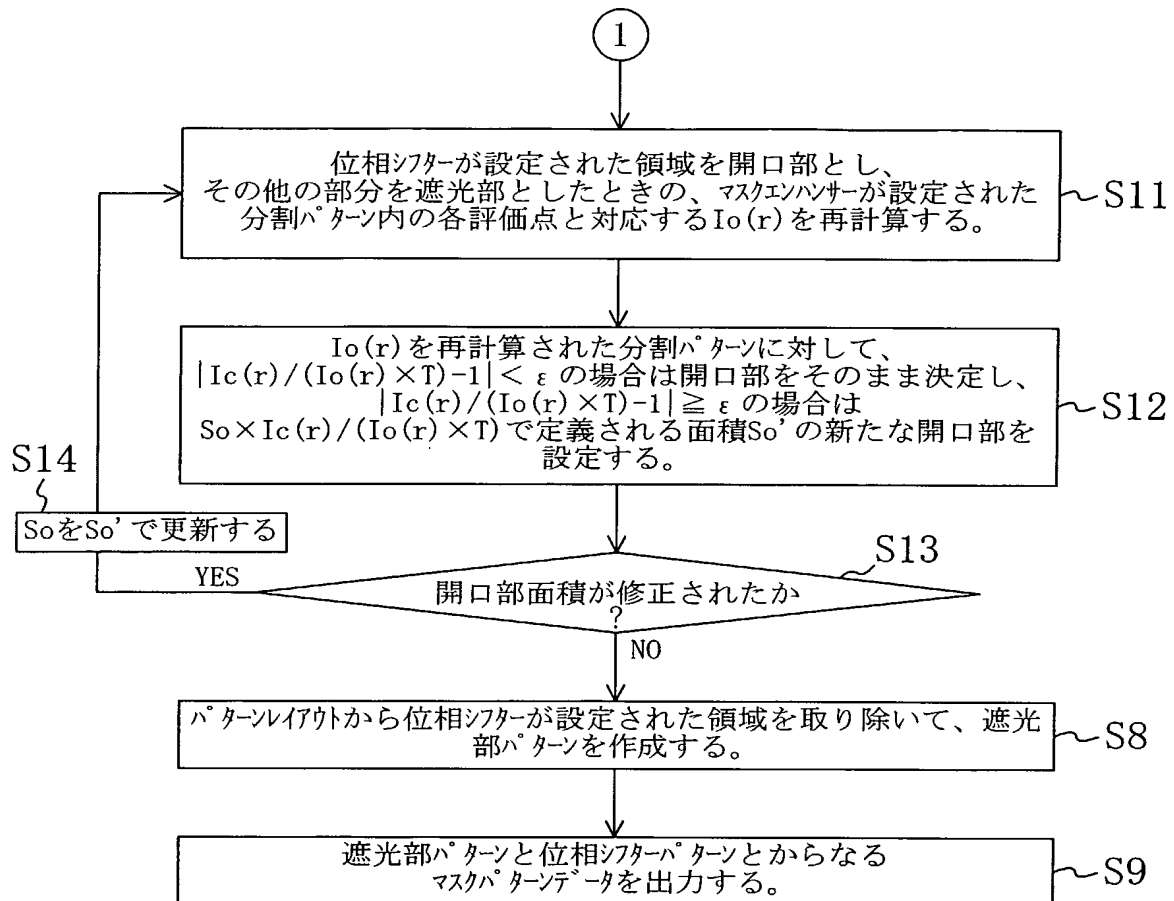
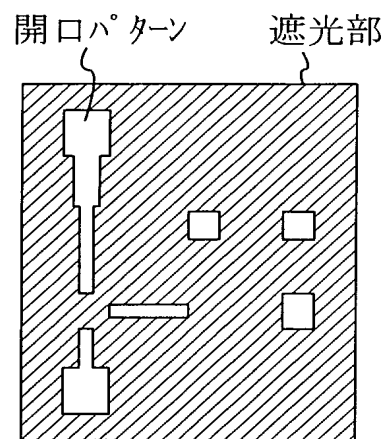


Fig. 47

[評価用マスクC]



47 / 56

Fig. 48

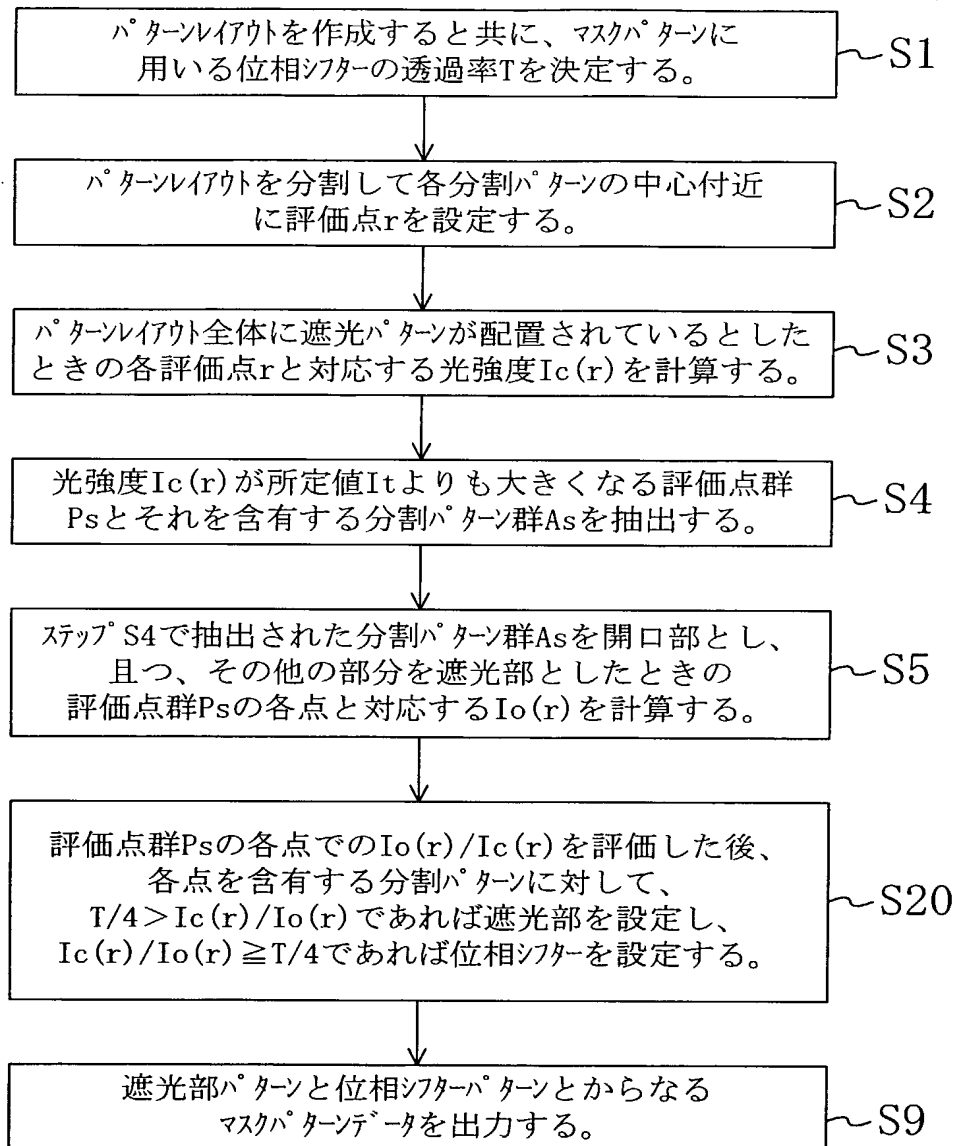


Fig. 49

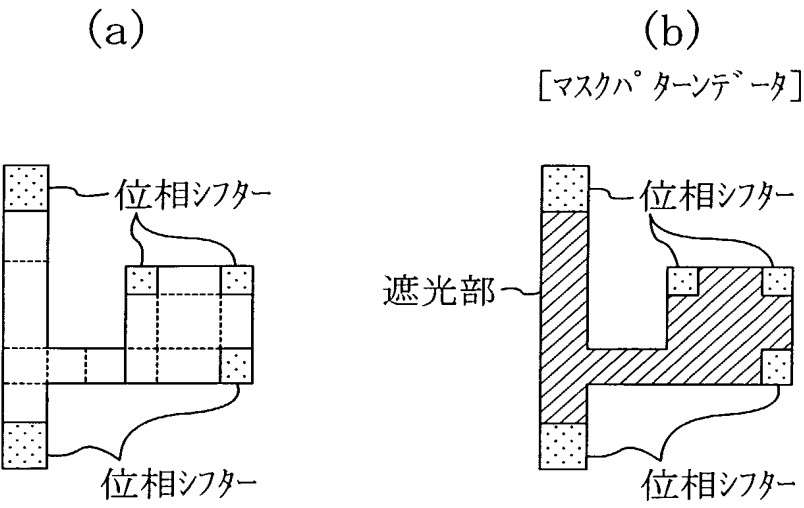
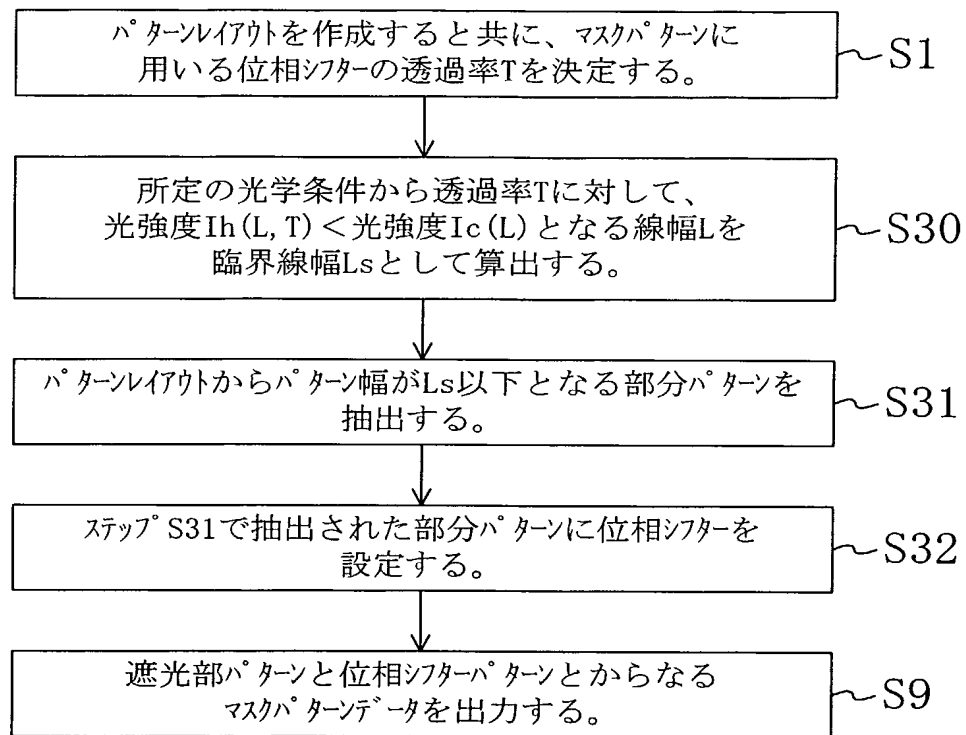


Fig. 50



50 / 56

Fig. 51

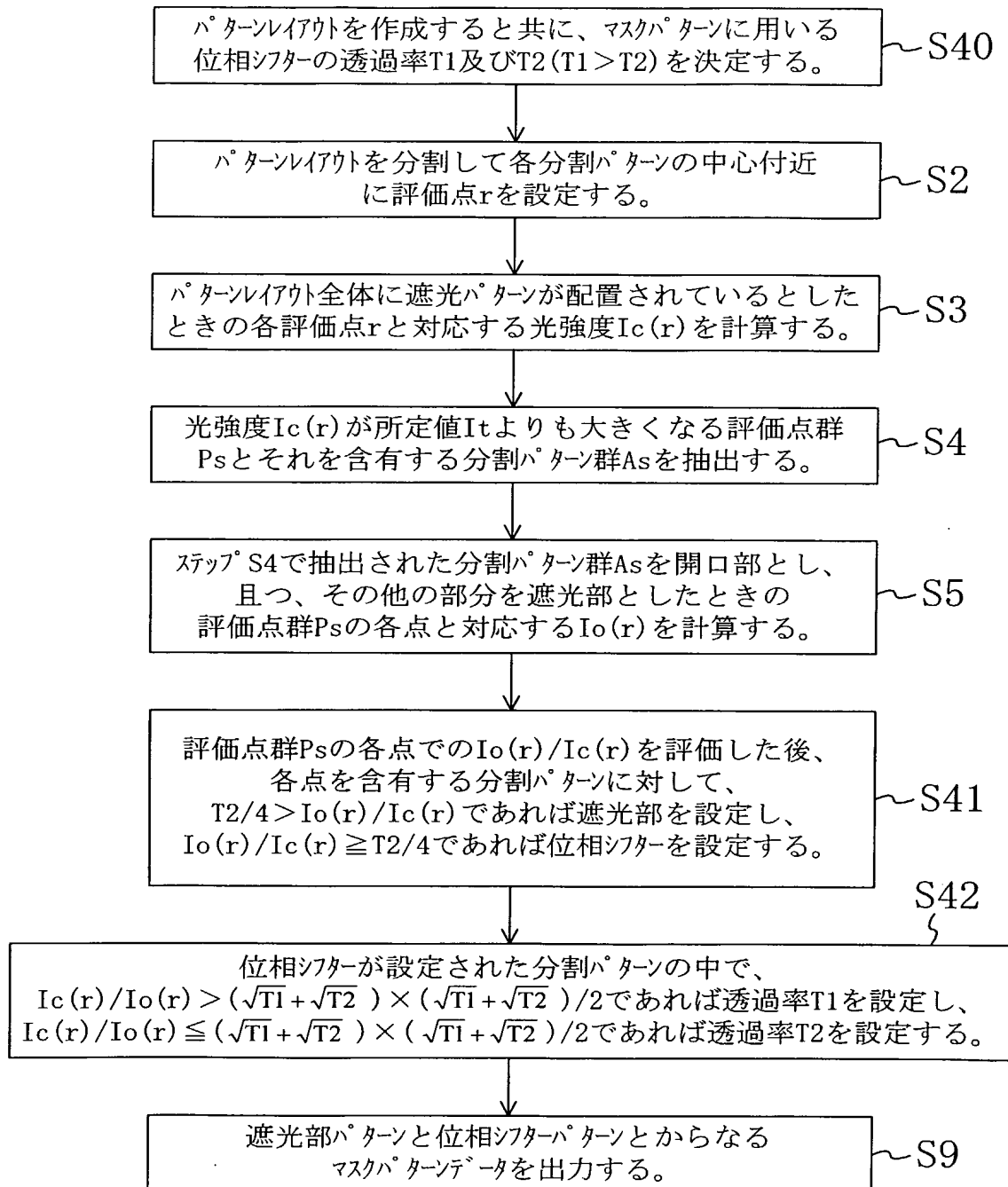


Fig. 52

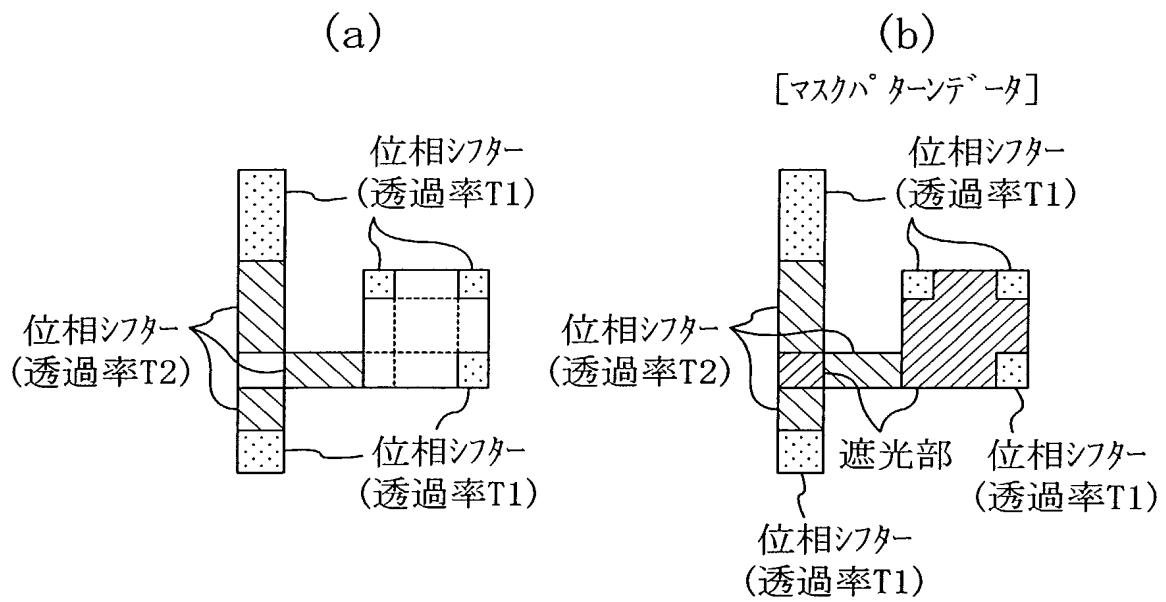


Fig. 53

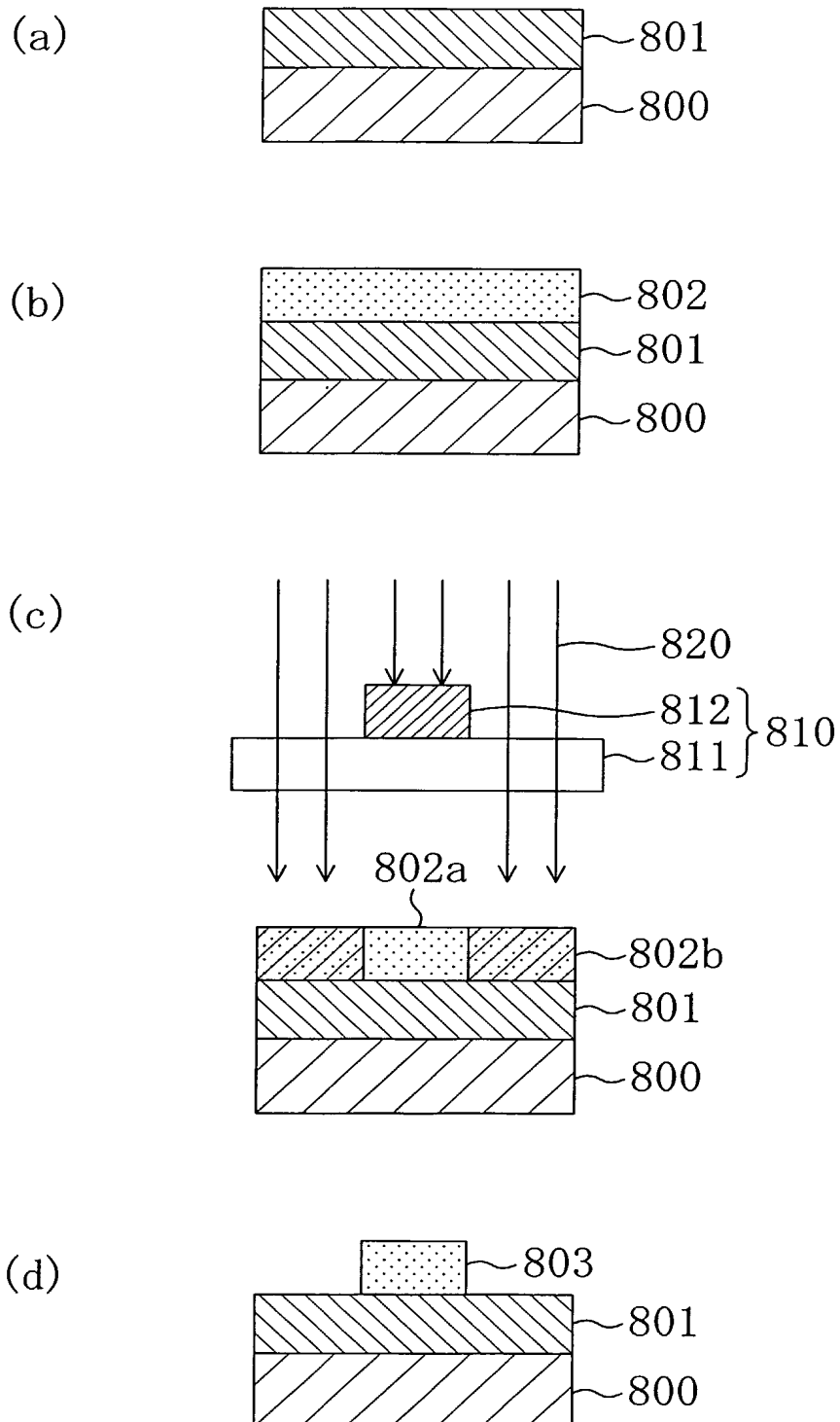


Fig. 54

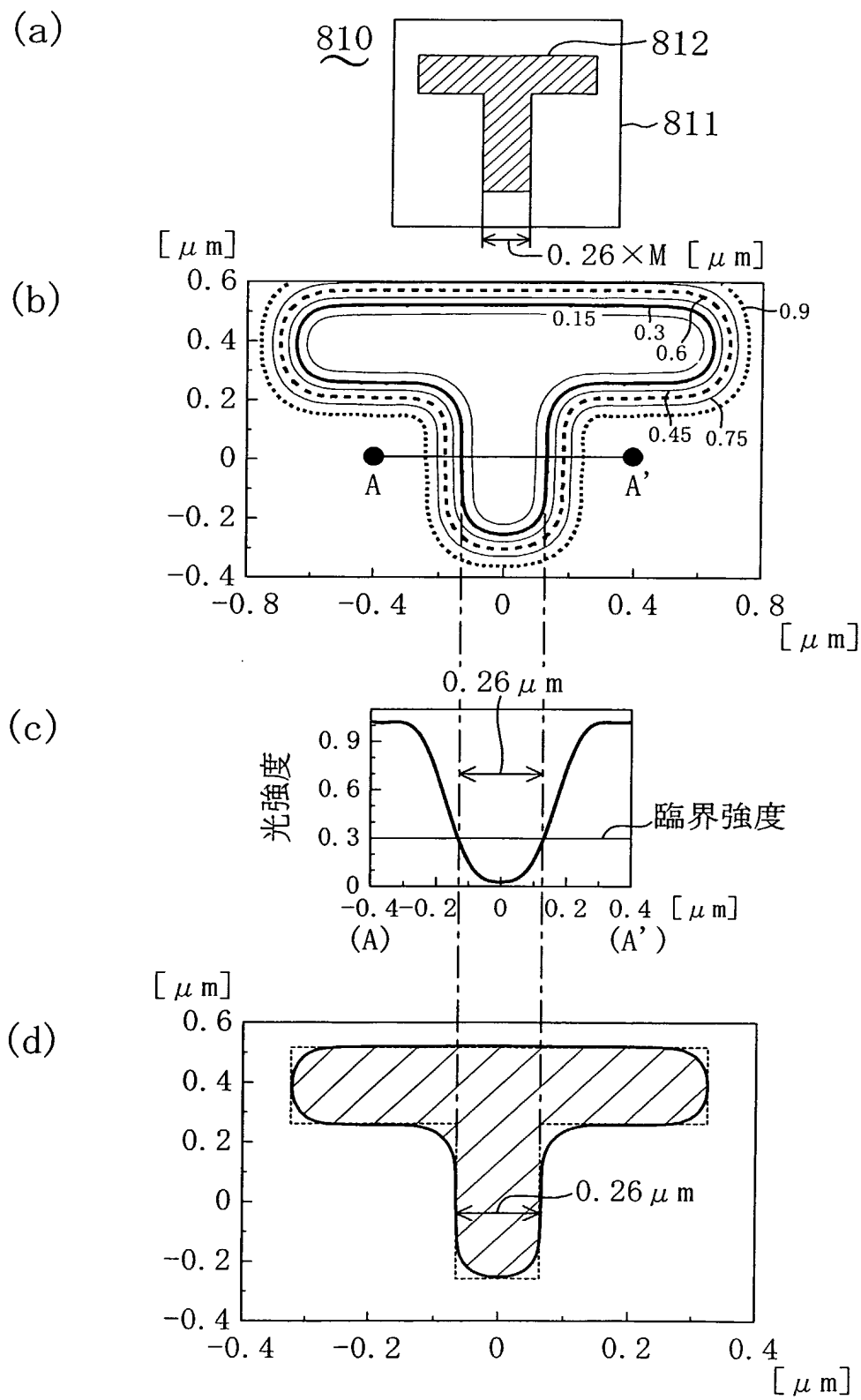


Fig. 55

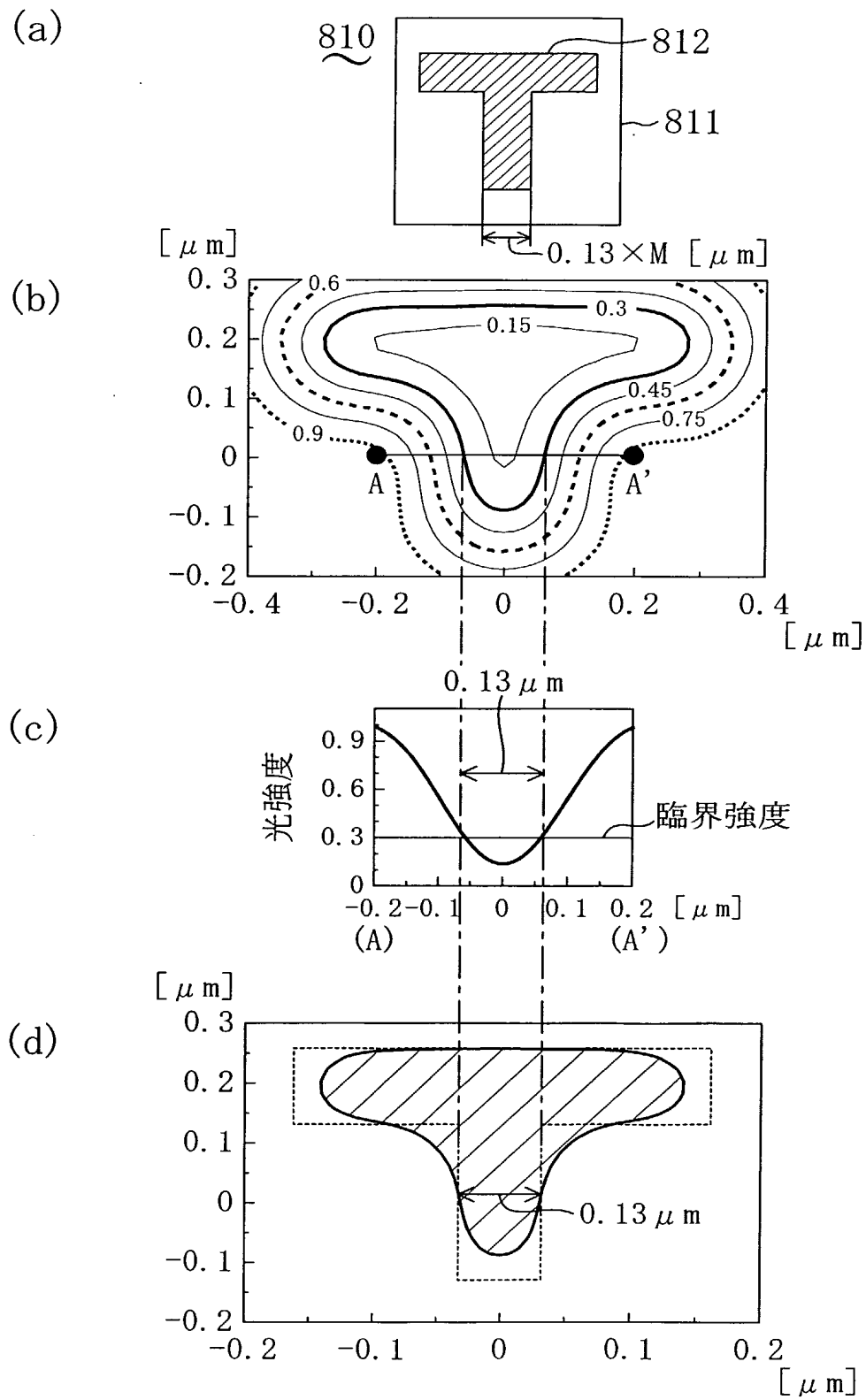


Fig. 56

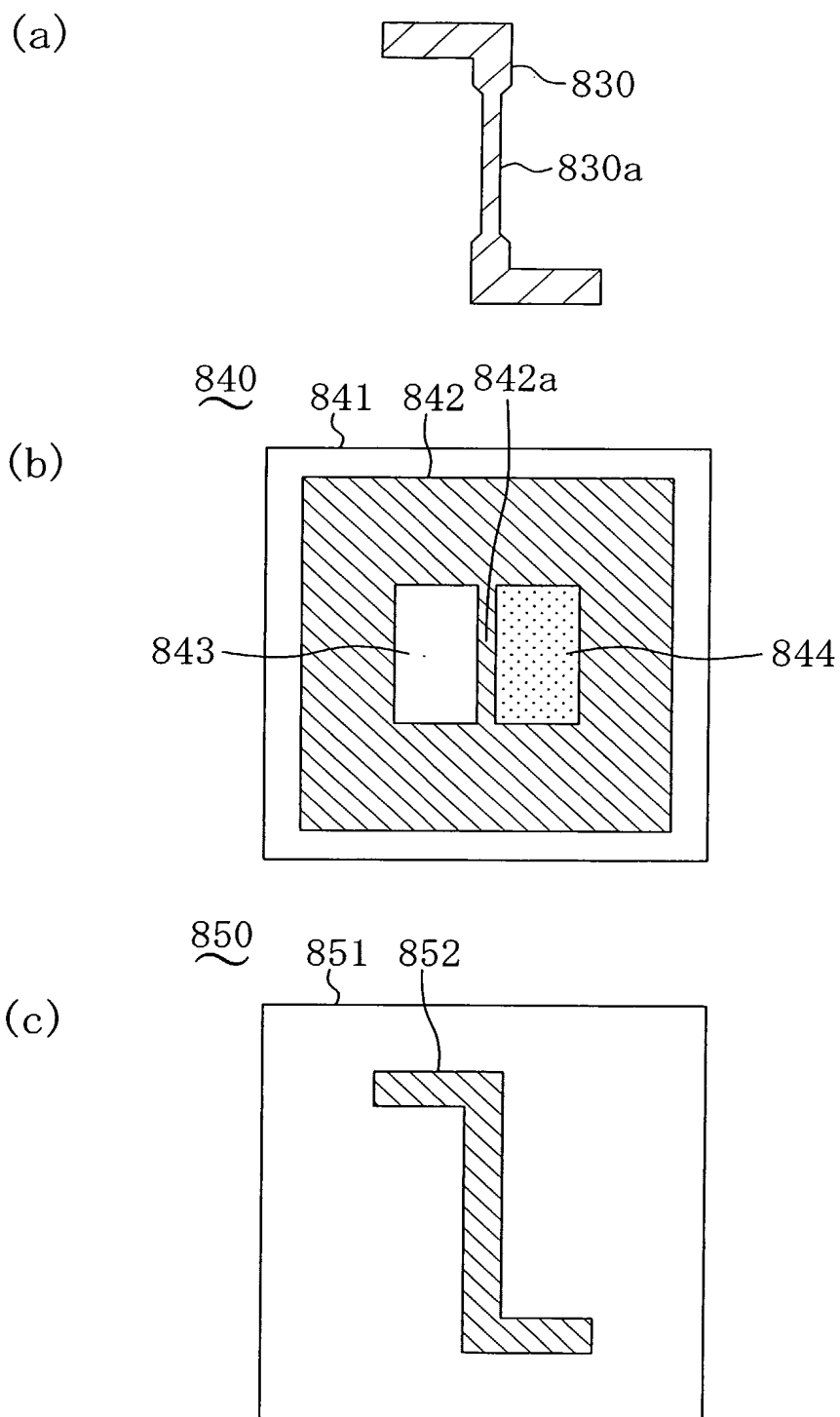
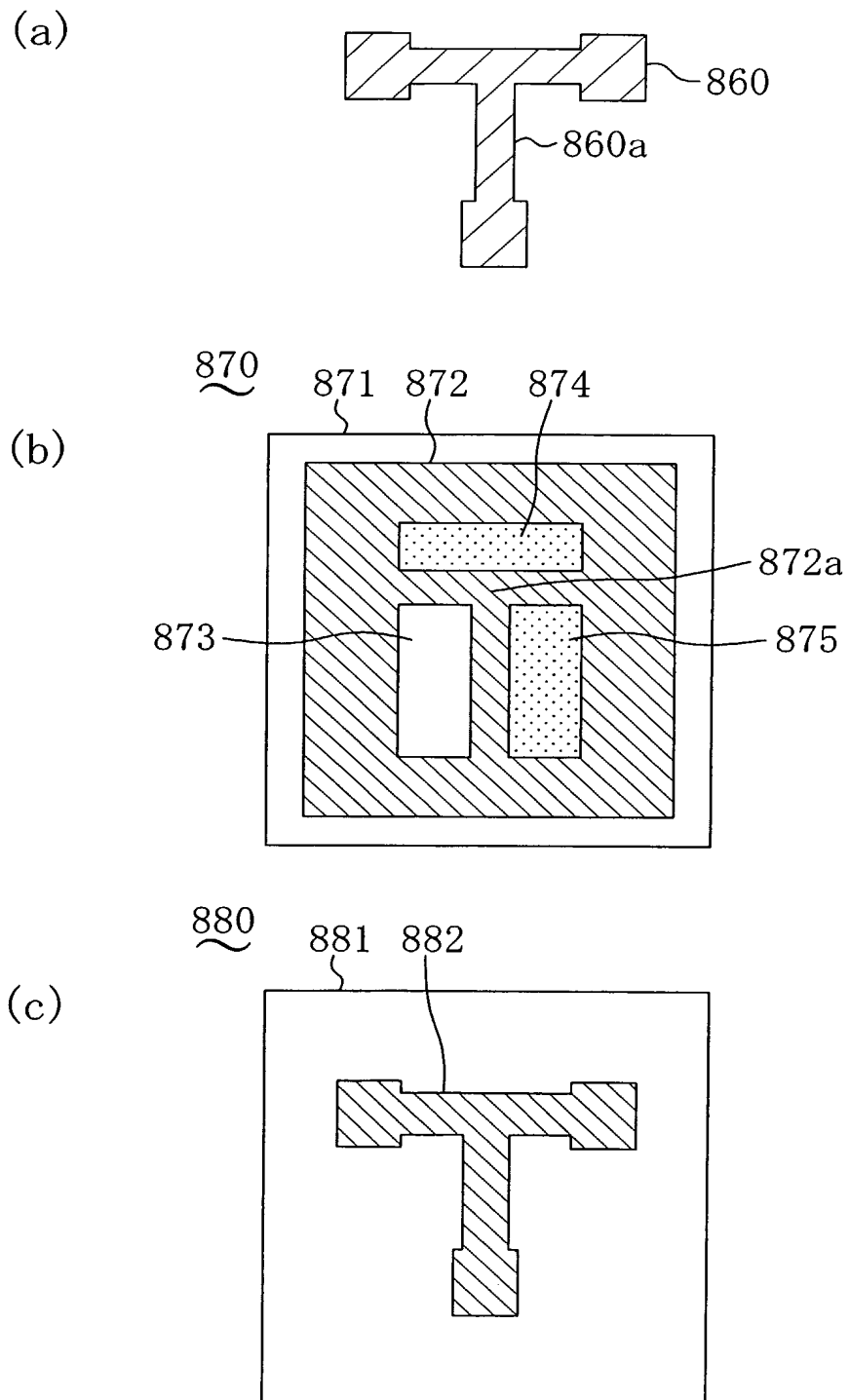


Fig. 57



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP02/03976

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl⁷ G03F1/08

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl⁷ G03F1/08

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

| | | | |
|---------------------------|-----------|----------------------------|-----------|
| Jitsuyo Shinan Koho | 1926-1996 | Toroku Jitsuyo Shinan Koho | 1994-2002 |
| Kokai Jitsuyo Shinan Koho | 1971-2002 | Jitsuyo Shinan Toroku Koho | 1996-2002 |

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| X A | JP 09-115809 A (Fujitsu Ltd.), 02 May, 1997 (02.05.97), Problem to be solved by the invention (Family: none) | 1-49 50-57 |
| X A | JP 2000-10255 A (Toppan Printing Co., Ltd.), 14 January, 2000 (14.01.00), Made for carrying out the claimed invention (Family: none) | 1-49 50-57 |

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>* Special categories of cited documents:</p> <p>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>"E" earlier document but published on or after the international filing date</p> <p>"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> | <p>"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>"&" document member of the same patent family</p> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Date of the actual completion of the international search
08 May, 2002 (08.05.02)

Date of mailing of the international search report
28 May, 2002 (28.05.02)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ G03F1/08

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ G03F1/08

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1926-1996年
 日本国公開実用新案公報 1971-2002年
 日本国登録実用新案公報 1994-2002年
 日本国実用新案登録公報 1996-2002年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

| 引用文献の カテゴリー* | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示 | 関連する 請求の範囲の番号 |
|-----------------|-------------------------------------------|------------------|
| X | J P 09-115809 A (富士通株式会社) 1997.05.02 | 1-49 |
| A | 発明が解決しようとする課題 (ファミリーなし) | 50-57 |
| X | J P 2000-10255 A (凸版印刷株式会社) 2000.01.14 | 1-49 |
| A | 発明の実施の形態 (ファミリーなし) | 50-57 |

☐ C欄の続きにも文献が列举されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
 「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

08.05.02

国際調査報告の発送日

28.05.02

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)
 郵便番号100-8915
 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

大熊 靖夫



2M

9710

電話番号 03-3581-1101 内線 3225

DERWENT-ACC-NO: 2003-019757**DERWENT-WEEK:** 200832*COPYRIGHT 2008 DERWENT INFORMATION LTD***TITLE:** Photo mask has shade portion composed
of a shade film such as a chromium film**INVENTOR:** MISAKA A; MITSUSAKA A**PATENT-ASSIGNEE:** MATSUSHITA DENKI SANGYO KK[MATU] ,
MATSUSHITA ELECTRIC IND CO LTD[MATU] ,
MISAKA A[MISAI]**PRIORITY-DATA:** 2002JP-001033 (January 8, 2002) , 2001JP-
133802 (May 1, 2001)**PATENT-FAMILY:**

| PUB-NO | PUB-DATE | LANGUAGE |
|-------------------|--------------------|-----------------|
| WO 02091079 A1 | November 14, 2002 | JA |
| JP 2003021891 A | January 24, 2003 | JA |
| TW 538455 A | June 21, 2003 | ZH |
| EP 1365288 A1 | November 26, 2003 | EN |
| KR 2003076244 A | September 26, 2003 | KO |
| US 20040029023 A1 | February 12, 2004 | EN |
| JP 2005123646 A | May 12, 2005 | JA |
| JP 2005141247 A | June 2, 2005 | JA |
| JP 2005141248 A | June 2, 2005 | JA |
| JP 3708877 B2 | October 19, 2005 | JA |
| JP 3708952 B2 | October 19, 2005 | JA |
| JP 3708954 B2 | October 19, 2005 | JA |
| JP 3759948 B2 | March 29, 2006 | JA |
| US 20060121366 A1 | June 8, 2006 | EN |
| US 7060395 B2 | June 13, 2006 | EN |
| US 20060177747 A1 | August 10, 2006 | EN |
| KR 498681 B | July 1, 2005 | KO |

| | | |
|---------------|----------------|----|
| US 7364822 B2 | April 29, 2008 | EN |
| US 7361436 B2 | April 22, 2008 | EN |

DESIGNATED-STATES: KR US AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB
 GR IE IT LU MC NL PT SE TR AT BE CH
 CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU
 MC NL PT SE TR

APPLICATION-DATA:

| PUB-NO | APPL-DESCRIPTOR | APPL-NO | APPL-DATE |
|-----------------|------------------------|--------------------|----------------------|
| WO2002091079A1 | N/A | 2002WO- JP03976 | April 22, 2002 |
| JP2003021891A | N/A | 2002JP- 001033 | January 8, 2002 |
| JP 3708877B2 | N/A | 2002JP- 001033 | January 8, 2002 |
| EP 1365288A1 | N/A | 2002EP- 720545 | April 22, 2002 |
| EP 1365288A1 | N/A | 2002WO- JP03976 | April 22, 2002 |
| US20040029023A1 | N/A | 2002WO- JP03976 | April 22, 2002 |
| US 7060395B2 | N/A | 2002WO- JP03976 | April 22, 2002 |
| KR 498681B | N/A | 2002WO- JP03976 | April 22, 2002 |
| TW 538455A | N/A | 2002TW- 108534 | April 25, 2002 |
| KR2003076244A | N/A | 2002KR- 718066 | December 31, 2002 |
| KR 498681B | N/A | 2002KR- 718066 | December 31, 2002 |
| US20040029023A1 | N/A | 2003US- 399762 | April 22, 2003 |
| US 7060395B2 | N/A | 2003US- 399762 | April 22, 2003 |

| | | | |
|-----------------|----------|-------------------|----------------------|
| JP2005123646A | N/A | 2004JP- 367505 | December 20, 2004 |
| JP 3708952B2 | N/A | 2004JP- 367505 | December 20, 2004 |
| JP2005141247A | N/A | 2005JP- 014184 | January 21, 2005 |
| JP 3759948B2 | N/A | 2005JP- 014184 | January 21, 2005 |
| JP2005141248A | N/A | 2005JP- 014212 | January 21, 2005 |
| JP 3708954B2 | N/A | 2005JP- 014212 | January 21, 2005 |
| US20060121366A1 | N/A | 2005US- 298741 | December 12, 2005 |
| US 7361436B2 | N/A | 2005US- 298741 | December 12, 2005 |
| US20060177747A1 | N/A | 2006US- 396564 | April 4, 2006 |
| US 7364822B2 | Based on | 2006US- 396564 | April 4, 2006 |

INT-CL-CURRENT :

| TYPE | IPC DATE |
|-------------|--------------------|
| CIPP | G03C5/00 20060101 |
| CIPP | G03F1/00 20060101 |
| CIPP | G03F1/08 20060101 |
| CIPP | G03F1/08 20060101 |
| CIPP | G03F9/00 20060101 |
| CIPS | G03F1/00 20060101 |
| CIPS | G03F1/00 20060101 |
| CIPS | G03F1/14 20060101 |
| CIPS | G03F7/20 20060101 |
| CIPS | G06F17/50 20060101 |

CIPS H01L21/027 20060101

CIPS H01L21/027 20060101

ABSTRACTED-PUB-NO: WO 02091079 A1**BASIC-ABSTRACT:**

NOVELTY - A mask pattern (40) having a shade portion (41) composed of a shade film such as a chromium film and phase shifters (42,43) is formed on a transparent substrate (30). The phase shifter causes a phase difference of 180 degrees of the exposure light between the phase shifter and the transparent substrate.

DESCRIPTION - A first light intensity generated by exposure light passing through the phase shifter in a shade image formation region corresponding to the mask pattern on the material to be exposed is not greater than four times of a second light intensity generated in the shade image formation region by the exposure light coming onto the rear side of the mask pattern passing through a peripheral portion of the mask pattern in the transparent substrate.

DESCRIPTION OF DRAWING(S) - transparent substrate (30)

mask pattern (40)

shade portion (41)

chromium film and phase shifters (42,43)

CHOSEN-DRAWING: Dwg.5/57**TITLE-TERMS:** PHOTO MASK SHADE PORTION COMPOSE FILM
CHROMIUM**DERWENT-CLASS:** P83 P84 U11

EPI-CODES: U11-C04E2;

SECONDARY-ACC-NO:

Non-CPI Secondary Accession Numbers: 2003-015179